



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**AUTOMATIZACE PROCESU SVAŘOVÁNÍ HSS V  
PROSTŘEDÍ JE**

HSS WELDING PROCESS AUTOMATION IN NUCLEAR POWER PLANT

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Ing. Eliška Charvátová

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Jaroslav Kubíček

**BRNO 2019**

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Studentka: **Ing. Eliška Charvátová**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Strojírenská technologie  
Vedoucí práce: **Ing. Jaroslav Kubíček**  
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## **Automatizace procesu svařování HSS v prostředí JE**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Heterogenní spoje korozivzdorné a uhlíkové oceli jsou na parogenerátoru JE Dukovany. Jejich oprava je náročná z hlediska vysoké radiace. BP řeší možnosti mechanizovaného svařování metodou 141 s využitím Ni mezivrstvy.

### **Cíle bakalářské práce:**

1. Rozbor současného stavu oprav heterogenního spoje
2. Literární studie dané problematiky
3. Návrh a provedení experimentální práce
4. Technicko – ekonomické vyhodnocení

### **Seznam doporučené literatury:**

AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. Technologie svařování a zařízení. Ostrava: ZEROSS, 2001, 395 s. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.

FOLDYNA, Václav, Karel HENNHOFFER, Věra OLŠANOVÁ, Ivo HLAVATÝ, Jaroslav KOUKAL, František KRISTOFORY, Vladislav OCHODEK, Václav PILOUS, Jaroslav PURMENSÝ, Drahomír, SCHWARZ a Július VESELKO. Materiály a jejich svařitelnost. 2 vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001, 292 s. ISBN 80-857-7185-3.

ONDREJČEK, P. Zváranie ocelí v ochrane plynov taviacou sa elektródou, 1vyd. ETERNA PRESS s.r.o. Bratislava 2003, ISBN 80-968359-5-5.

OLSON D.L. a kolektiv autorů. ASM Handbook. Welding, brazing, and soldering Volume 6, vyd. Materials Park, Ohio, 2011. ISBN-13978-1-61503-133-7.

HRIVŇÁK, Ivan. Zváranie a zvariteľnosť materiálov. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2009, 486 s. :il., čb. fot. ISBN 978-80-227-3167-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

CHARVÁTOVÁ Eliška: Automatizace procesu svařování HSS v prostředí JE

---

Bakalářská práce srovnává ruční a mechanizovaný způsob svařování při výrobě heterogenního svarového spoje. Vzorky byly svařeny z austenitických a feriticko-perlitických základních materiálů za použití stejného typu vysoko-legovaného přídavného materiálu. Geometrie spoje pro oba způsoby shodná. Byly provedeny nedestruktivní a destruktivní kontroly, srovnány strukturní změny v materiálech dané různým množstvím vneseného tepla do svarového spoje. Zvýšení korozní odolnosti vnitřního povrchu potrubí zajistí niklová vrstva.

Klíčová slova: Heterogenní svarový spoj, ruční svařování, mechanizované svařování, TIG, nedestruktivní a destruktivní zkoušení, niklová vrstva

## **ABSTRACT**

CHARVÁTOVÁ Eliška: HSS Welding Process Automation in Nuclear Power Plant

---

The bachelor thesis compares the manual and mechanized method of welding in the production of dissimilar weld joint. The samples were welded from austenitic and ferritic-perlitic parent materials with using the same type of high alloy filler material. Joint geometry is identical for both methods. Nondestructive and destructive controls were performed, the structural changes in the materials given by the different amounts of heat transfer into the weld joint were compared. Increasing the corrosion resistance of the inner pipe surface is ensured by nickel layer.

Keywords: Dissimilar weld joint, manual welding, mechanized welding, TIG, nondestructive and destructive testing, nickel layer

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

CHARVÁTOVÁ, Eliška. Automatizace procesu svařování HSS v prostředí JE. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117313>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce Jaroslav Kubíček.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne 24.5.2019

.....

Podpis

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji panu Jaroslavovi Kubíčkovvi za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce.

Velké díky patří mým spolužákům, kolegům a blízkým za jejich trpělivost, vstřícnost a podporu. Děkuji Vladimírovi Šmardovi za pomoc při přípravě experimentu. Pánům z EGS za výrobu svarových úkosů, Antonínovi Salákovi a Davidovi Sobotkovi za skvělou práci během svařování. Samotné uskutečnění NDT a DT by nebylo možné bez Zdeňka Čančury, Jiřího Hajdíka a Petra Cahy. Bližší seznámení s nedestruktivními kontrolami zajistili Josef Smolík, Martin Fajkus a Ondřej Sýkora. Destruktivními kontrolami mě provedla Dana Tonarová a její kolegové z ÚJV. Je spousta dalších lidí (Rostislav Slováček, Pavel Mlynář, Eva Molliková, ...), kteří mi byli ochotni poradit, pomoci a obětovali svůj čas. Doufám, že práce nesnížila váš přínos.

# OBSAH

Zadání	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
Obsah	

	Str.
<b>ÚVOD</b> .....	10
<b>1 ROZBOR ZADÁNÍ</b> .....	10
<b>1.1 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ</b> .....	20
<b>2 SVAŘOVÁNÍ METODOU TIG (WIG)</b> .....	22
<b>2.1 Druhy svařovacích proudů</b> .....	23
<b>2.2 Svařovací hořáky</b> .....	24
<b>2.3 Netavící se wolframové elektrody</b> .....	25
<b>2.4 Ochranné plyny</b> .....	25
<b>2.5 Přídavný materiál</b> .....	26
<b>2.6 Ruční svařování</b> .....	27
<b>2.7 Strojní svařování, automatizace</b> .....	27
<b>2.8 Vliv teploty při svařování</b> .....	29
<b>2.9 Ochrana povrchu</b> .....	31
<b>3 EXPERIMENT</b> .....	31
<b>3.1 Použité materiály</b> .....	32
<b>3.2 Příprava svarových ploch</b> .....	33
<b>3.3 Postup svařování</b> .....	33
3.3.1 Stehování .....	33
3.3.2 Ruční svařování .....	33
3.3.3 Mechanizované orbitální svařování.....	34
<b>3.4 Nedestruktivní kontroly</b> .....	37
3.4.1 VT (vizuální kontrola) .....	37
3.4.2 PT (kapilární zkouška) .....	37
3.4.3 RT (prozařovací zkouška) .....	38
3.4.4 UT-PA (ultrazvuková zkouška – Phased Array) .....	39
<b>3.5 Destruktivní kontroly</b> .....	41
3.5.1 Stereometrická kontrola vnitřního povrchu.....	41
3.5.2 Metalografie .....	44



3.5.3 Mikrotvrdost .....	48
<b>3.6 Zvýšení korozní odolnosti.....</b>	<b>51</b>
<b>4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ .....</b>	<b>54</b>
<b>5 ZÁVĚRY .....</b>	<b>54</b>

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam obrázků

Seznam tabulek a grafů

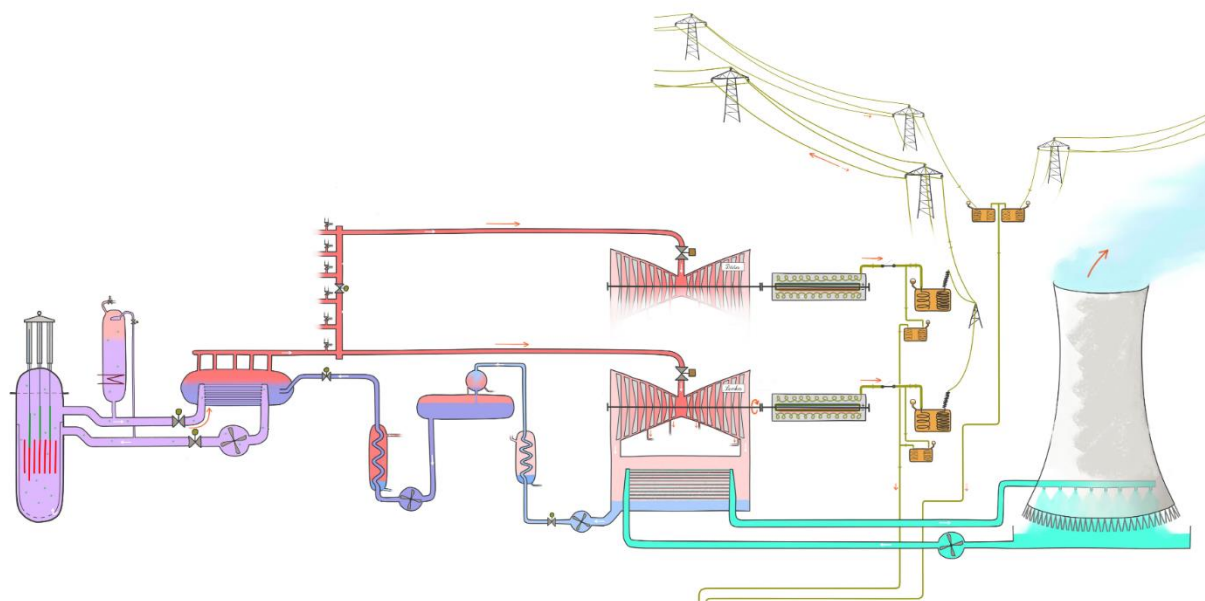
Seznam příloh

## ÚVOD [1], [2]

V České republice se nachází dvě jaderné elektrárny. JE Dukovany a JE Temelín. Společně disponují elektrickým výkonem přes 4000 MW.

Provozování jaderných elektráren je neoddělitelně spojeno s bezpečností. Proto se musí před vstupem do areálu projít několika kontrolami, proto jsou bezpečnostní systémy násobně zálohovány, zařízení chráněna bezpečnostními bariérami podle jejich vlivu na jadernou bezpečnost, proto existuje Státní úřad pro jadernou bezpečnost, proto se kladé důraz na kvalitu provedení prací, samozřejmě i těch svářečských. Základní legislativou je zákon č. 263/2016 Sb., atomový zákon včetně jeho osmnácti prováděcích právních předpisů. Navrhování a provozování důležitých zařízení se řídí hlavně NTD A.S.I.

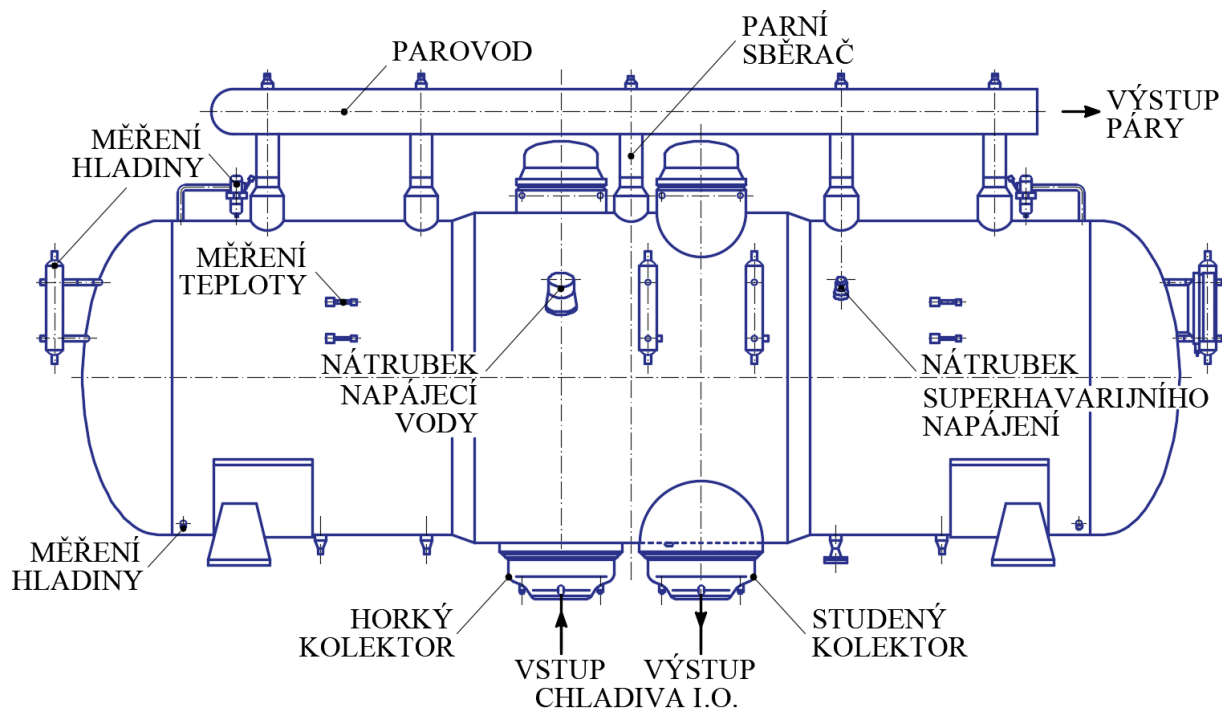
Nedílnou součástí systému, konstrukcí a komponent na JE jsou heterogenní svarové spoje (HSS). Snaha o minimalizaci rizik spojených s provozováním HSS vedla k mnoha investičním akcím na obou elektrárnách. Riziková místa byla zařazena do tzv. programu RMSS. V databázi jsou shromažďovány informace o potenciálně kritických místech se svarovými spoji, nastaven trend kontrol. Po provedených nedestruktivních kontrolách (RT + UT-PA) bylo uskutečněno velké množství oprav, hledaly se příčiny vzniku vad. Některé původní HSS se nahrazují přírubovými spoji, dílenskými mezikusy, nebo jsou zcela zrušeny (i z preventivních důvodů); proběhla kvalifikace oprav nestandardní metodou WOL. Nároky na svarové spoje způsobily růst zájmu o použití mechanizovaného způsobu svařování, jehož nasazení má zlepšit kvalitu provedení. Neposlední výhodou je ochrana pracovníků před účinky ionizujícího záření, resp. před získáním nadbytečné dávky záření.



Obr. 1: Základní schéma JE Dukovany [2]

## 1 ROZBOR ZADÁNÍ [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24]

Jedním ze stěžejních představitelů zařízení jaderných elektráren, na kterém se vyskytují heterogenní svarové spoje, je parní generátor. Tento horizontální tepelný výměník (obr. 2) zajišťuje přenos tepelné energie z primárního do sekundárního okruhu.



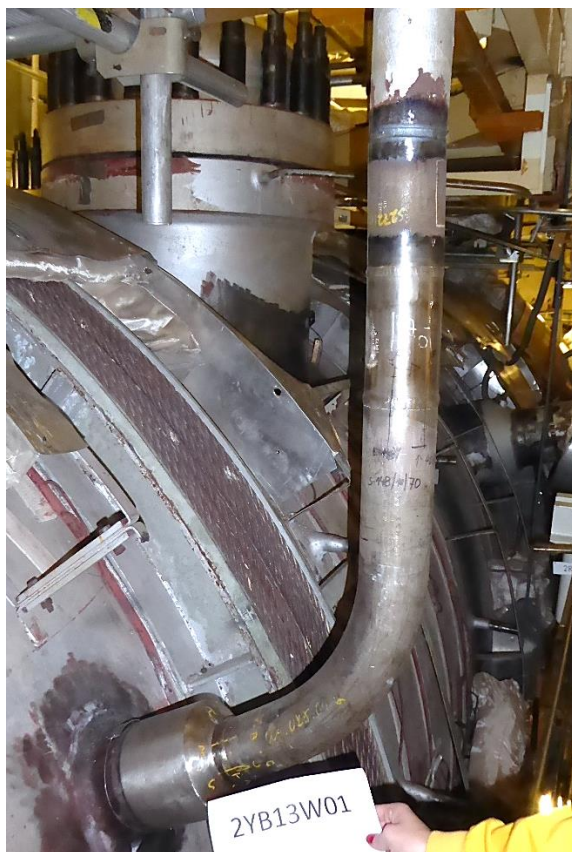
Obr. 2: Parogenerátor V-213 [4]

Těleso PG tvoří tlaková nádoba (plášť) s vnitřním průměrem 3210 mm a délkou 11800 mm. Je svařeno ze dvou středních kroužků o síle stěny 135 mm a dvou krajních kroužků s tloušťkou 75 mm. Kroužky svařeny z lubů, eliptická dna o tloušťce 84 mm přivařena k plášti po dokončení montáže vnitřní vestavby. Hmotnost prázdného PG 169 t, zcela zaplněného 261 t. Materiál pláště tvoří ocel 22K. 22K je ocel nízkolegovaná s přísadou vanadu pro získání jemného zrna a tím i poměrně vysokých pevnostních hodnot požadovaných při pracovní teplotě. Dalším důvodem použití nízkolegované oceli je její nižší cena. Tyto oceli však nemají vysokou odolnost proti koroznímu napadení. Teplosměnnou plochu PG tvoří 5536 trubiček z materiálu 08Ch18N10T. Tato ocel je díky vyššímu obsahu chromu schopna pasivace a odolává koroznímu prostředí. Napájení PG vodou je též řešeno pomocí potrubí z austenitického materiálu. V havarijním případě se voda přivádí přes nátrubek superhavarijního napájení (fotografie místa na obr. 3, část příčného řezu na obr. 4). Potrubí vně PG v provedení z uhlíkového materiálu navazuje na austenitické tvořící rozvod média v parním prostoru.

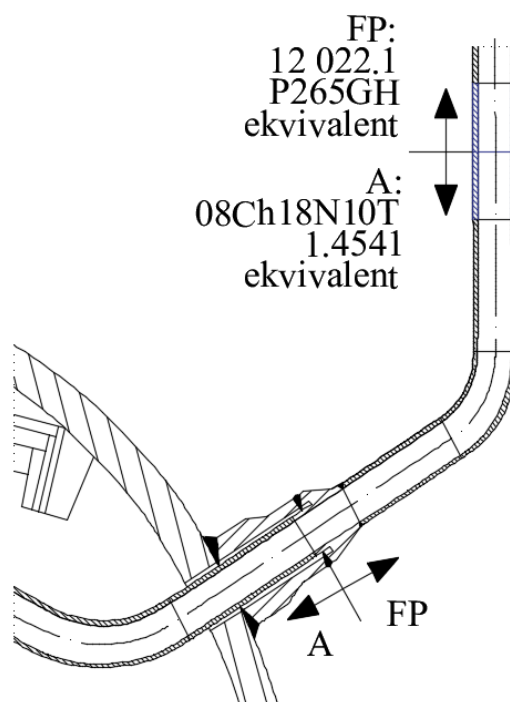
TPE 10-40/1771/2014-JE Všeobecné technické podmínky pro montážní svařování potrubí elektráren typu VVER předepisují, že pokud svařujeme různorodé oceli, které nejsou opatřené přechodovým návarem už v dílenské přípravě na montáž, musí být provedeny tzv. přechodové kusy. Ty se vyrobí v dílenských podmínkách z polotovarů odpovídajících materiálu použitého na montáži.

Právě napojení v kombinaci austenitu a feriticko-perlitického materiálu (zvýrazněné na obr. 4) je na bloku JE řešeno s přispěním dílenského mezikusu. Provedení spoje bude i předmětem práce. Spoj bude svařen dvěma metodami, a to ručně a za pomoci mechanizovaného orbitálního svařování. Vzorky budou podrobeny nedestruktivním kontrolám,

které se běžně u zařízení této kategorie požadují (vizuální a kapilární zkouška, radiografické i ultrazvukové zkoušení metodou Phased Array). Změny struktury použitých materiálů způsobené rozdílnou hodnotou vneseného tepla během svařování budou ověřeny destruktivními zkouškami na metalografických vzorcích, bude provedeno měření mikrotvrdosti.



Obr. 3: Potrubí SHN, napojení na PG



Obr. 4: Potrubí SHN, část příčného řezu PG [4]

Použité materiály musí být v souladu s NTD A.S.I., Sekce II schválené jako případný ekvivalent. Ocel 22K (GOST 5520-79) lze nahradit P265GH (ČSN EN 10028-2) a 12 022 (ČSN 41 2022), 08Ch18N10T (GOST 5632-72; dle ČSN EN 10088-3 X6CrNiTi18-10) např. 1.4541 (ČSN EN 10088-1). Možné použití přídatných materiálů uvádí NTD A.S.I., Sekce I. Jako přídatný materiál byl zvolen Sv-07Ch25N13.

Chemické složení austenitických ocelí uvádí tab. 1, jejich vybrané mechanické, popř. fyzikální vlastnosti tab. 2. Parametry feriticko-perlitických (FP) ocelí, viz tab. 3 a 4. Tabulka 5 zaznamenává složení přídatného materiálu Sv-07Ch25N13 (GOST 2246-70) a tab. 6 jeho vlastnosti.

Pro porovnání je požadované složení dle normy (označeno písmenem N) doplněno o parametry konkrétní tavby použitých materiálů v experimentální části dle inspekčních certifikátů (uloženy jako příloha č. 1 a 2).

Tab. 1: Chemické složení austenitických ocelí v hm. % (N – normové požadavky – hodnoty maximální či stanovený rozsah) [6], [10], [11], [14].

Složení	C	Mn	Si	P	S	Cu	Mo
08Ch18N10T (N)	0,08	1,50	0,80	0,035	0,02	0,30	0,30
Tavba 10473	0,061	1,16	0,41	0,024	0,01	0,02	0,22
Složení	Ti	Co	N	Ni	Cr	V	
08Ch18N10T (N)	0,60	0,05	0,05	10÷11,5	17÷19	0,20	
Tavba 10473	0,37	0,02	0,012	10,74	17,62	0,04	
Složení	C	Mn	Si	P	S	Cu	Mo
1.4541 (N)	0,08	2	1	0,045	0,03	-	-
Tavba A04667	0,06	1,43	0,27	0,04	0,007	-	-
Složení	Ti	Co	N	Ni	Cr	V	
1.4541 (N)	5×C÷0,7	-	-	9÷12	17÷19	-	
Tavba A04667	0,54	-	0,11	9,44	17,24	-	

Tepelné zpracování:

08Ch18N10T (tavba 10473) – rozpouštěcí žíhání (T = 1070 °C, voda).

1.4541 (tavba A04667) – rozpouštěcí žíhání (T = 1050 °C, výdrž 2 min·mm<sup>-1</sup>, rychlé zchlazení ve vodě).

Tab. 2: Mechanické a fyzikální vlastnosti 08Ch18N10T [6], [14].

08Ch18N10T	t <sub>20</sub> °C	t <sub>300</sub> °C
Smluvní mez kluzu R <sub>p0,2</sub> [MPa]	272	227
Pevnost v tahu R <sub>m</sub> [MPa]	627	412
Tažnost A <sub>5</sub> [%]	44	min. 26
Kontrakce Z [%]	55	52
Vrubová houževnatost KCV [J·cm <sup>-2</sup> ]	-	-
Součinitel délkové teplotní roztažnosti α <sub>t</sub> [K <sup>-1</sup> ]	16,4·10 <sup>6</sup> (t <sub>50</sub> °C)	17,4·10 <sup>6</sup>

Tab. 3: Mechanické vlastnosti 1.4541 [11], [14].

1.4541	t <sub>20</sub> °C	t <sub>300</sub> °C
Smluvní mez kluzu R <sub>p0,2</sub> [MPa]	270	min. 136
Pevnost v tahu R <sub>m</sub> [MPa]	584	-
Tažnost A <sub>5</sub> [%]	47	-
Kontrakce Z [%]	-	-
Vrubová houževnatost KCV [J·cm <sup>-2</sup> ]	-	-

Tab. 4: Chemické složení feriticko-perlitických ocelí v hm. % (N – normové požadavky – hodnoty maximální či stanovený rozsah) [6], [8], [9], [14], [15].

Složení	C	Mn	Si	P	S	Cu	
12022.1 (N)	0,15÷0,22	0,5÷0,8	0,17÷0,37	0,04	0,04	0,25	
Tavba 20251K	0,17	0,69	0,197	0,012	0,006	0,12	
Složení	Ti	Ni	Cr	V	Mo	Al	N
12022.1 (N)	0,05	0,25	0,25	0,02÷0,05	-	0,1÷0,15	-
Tavba 20251K	-	0,03	0,08	-	-	-	-
Složení	C	Mn	Si	P	S	Cu	
P265GH (N)	0,2	0,8-1,4	0,4	0,025	0,01	0,3	
Tavba 97931K	0,17	0,71	0,214	0,011	0,007	0,08	
Složení	Ti	Ni	Cr	V	Mo	Al	N
P265GH (N)	0,03	0,3	0,03	0,02	0,08	≥ 0,02	0,012
Tavba 97931K	-	0,04	0,05	-	0,012	0,03	-

Tepelné zpracování:

12022.1 (tavba 20251K) – normalizačně doválcováno

P265GH (tavba 97931K) – rozpouštěcí žíhání ( $T = 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ , výdrž  $2\text{ min}\cdot\text{mm}^{-1}$ , rychlé zchlazení ve vodě).

Tab. 5: Mechanické a fyzikální vlastnosti 12 022 [6], [11], [14].

12022	t <sub>20</sub> °C	t <sub>300</sub> °C
Smluvní mez kluzu R <sub>p0,2</sub> [MPa]	334	min. 177
Pevnost v tahu R <sub>m</sub> [MPa]	490	330
Tažnost A5 [%]	29,7	min. 19
Kontrakce Z [%]	40	39
Vrubová houževnatost [J·cm <sup>-2</sup> ]	41,3	-
Kritická teplota křehkosti t <sub>ko</sub> [°C]	-	
Součinitel délkové teplotní roztažnosti $\alpha_t$ [K <sup>-1</sup> ]	11,5·10 <sup>6</sup> (t <sub>50</sub> °C)	12,9·10 <sup>6</sup>

Tab. 6: Mechanické vlastnosti P265GH [8].

P265GH	t <sub>20</sub> °C	t <sub>300</sub> °C
Smluvní mez kluzu R <sub>p0,2</sub> [MPa]	245	min. 166
Pevnost v tahu R <sub>m</sub> [MPa]	410÷530	-
Tažnost A5 [%]	23	-
Kontrakce Z [%]	-	-
Vrubová houževnatost KCV [J·cm <sup>-2</sup> ]	-	-
Kritická teplota křehkosti t <sub>ko</sub> [°C]	-	

Tab. 7: Chemické složení Sv-07Ch25N13 v hm. % (N – normové požadavky – hodnoty maximální či stanovený rozsah) [13], [16], [17], [18].

Složení	C	Mn	Si	P	S	Co	Ni	Cr
Sv-07Ch25N13 (N)	0,1	0,8÷2,0	1,0	0,03	0,02	-	11,5÷14,0	22,0÷26,5
PN AE G-7-010-89	0,09	0,9÷2	0,14÷1,0	0,025	0,018	-	11,8÷14,0	22,8÷26,0
Tavba 103056 Ø1 mm	0,052	1,85	0,48	0,015	0,005	0,037	13,21	23,39
Tavba 103056 Ø2 mm	0,054	1,86	0,48	0,05	0,005	0,037	13,24	23,36
Tavba 103056 Ø2,5 mm	0,054	1,84	0,48	0,016	0,005	0,037	13,24	23,38

Obsah δ feritu 2÷8 hm. %

Tab. 8: Mechanické vlastnosti svarového kovu Sv-07Ch25N13 [13].

Sv-07Ch25N13	t20 °C	t350 °C
Smluvní mez $R_{p0,2}$ [MPa]	441	353
Pevnost v tahu $R_m$ [MPa]	284	176
Tažnost A5 [%]	25	-
Kontrakce Z [%]	35	-
Vrubová houževnatost KCV [ $J \cdot cm^{-2}$ ]	49	-

Korozivzdorné oceli jsou oceli s obsahem chromu nad 12 hm. % v závislosti na obsahu uhlíku. Jsou schopné pasivace a odolávají elektrochemické korozi v oxidačním prostředí. Struktura Cr-Ni ocelí je výsledkem kombinace feritotvorných (vyjádřeno tzv. ekvivalentem chromu  $Cr_E$ ) a austenitotvorných (tzv. ekvivalent niklu  $Ni_E$ ) prvků na strukturu oceli. Na základě těchto ekvivalentů byly zkonstruovány konstituční diagramy sloužící k odhadům výsledné struktury vysokolegovaných korozivzdorných ocelí. Jedná se o Schaefflerův diagram a De Longe doplnil dusík jako významný austenitotvorný prvek. Potom:

$$Cr_E = Cr + Mo + 1,5 \cdot Si + 0,5 \cdot Nb + 2 \cdot Ti \quad (1.1)$$

$$Ni_E = Ni + 30 \cdot C + 30 \cdot N + 0,5 \cdot Mn + 0,5 \cdot Cu \quad (1.2)$$

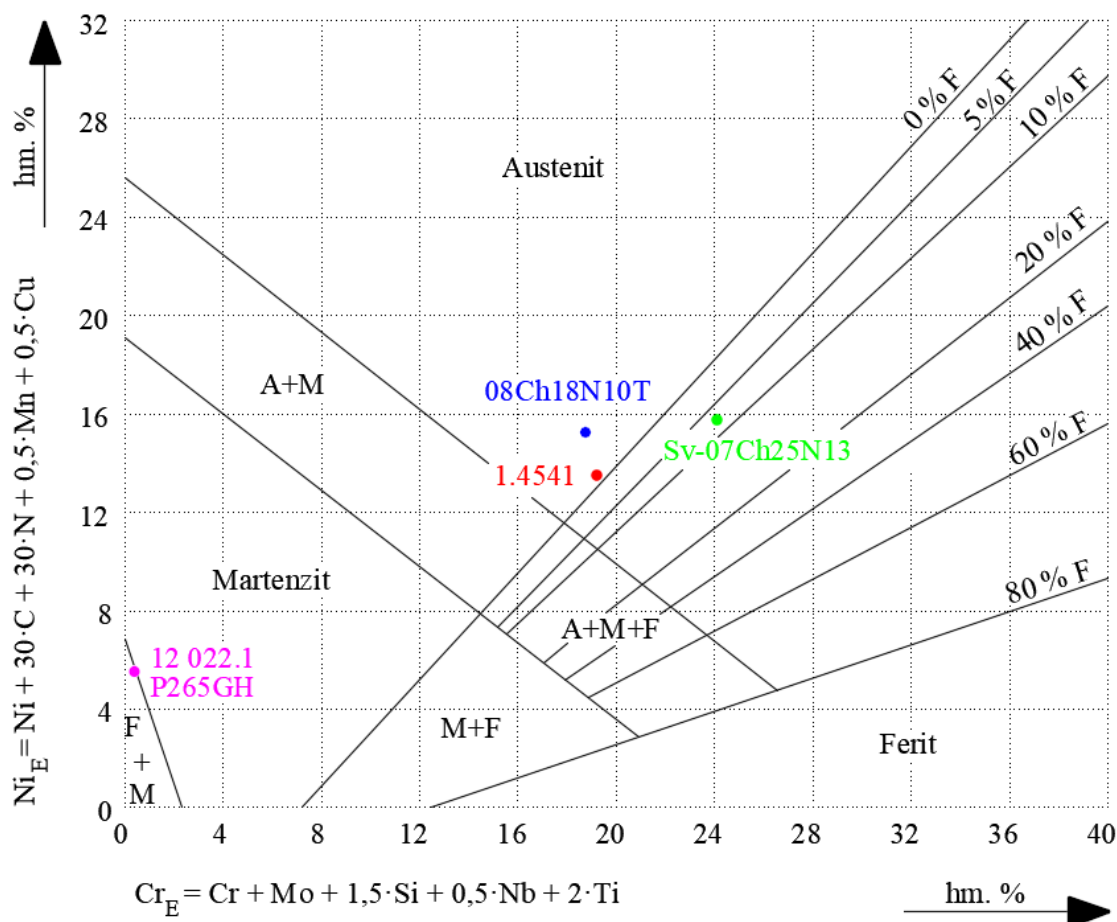
Ekvivalenty vypočítané dle vztahů 1.1 a 1.2 s parametry dle inspekčních certifikátů odpovídají pro základní materiál 08Ch18N10T:  $Cr_E = 19,2$  a  $Ni_E = 13,5$ , pro 1.4541:  $Cr_E = 18,7$  a  $Ni_E = 15,3$ . Složení přídatného materiálu se mírně liší podle průměru drátu. Hodnoty pro Sv-07Ch25N13:  $Cr_E = 24,1$  a  $Ni_E = 15,8$ .

Struktury základních materiálů zakomponované do Schaefflerova diagramu vychází austenitické; přídatný materiál by měl obsahovat okolo 7,5 hm. % feritu. Výsledná struktura bude záviset na vzájemném promíšení materiálů. Například u TIG svařování se promíšení pohybuje kolem 40–60 %.

Do diagramu umístěny i nelegované oceli 12 022.1 a P265GH; mají shodné ekvivalenty:  $Cr_E = 0,38$  a  $Ni_E = 5,54$ . Struktura převážně martenzitická s podílem feritu.



Umístění použitých materiálů v Schaefflerově diagramu (obr. 5):



Obr. 5: Schaefflerův diagram [19]

Svařitelnost austenitických Cr-Ni (Cr-Ni-Mo) ocelí ovlivňuje náchylnost k tvorbě horkých trhlin, precipitace karbidů chromu, jejímž důsledkem je mezikrystalová korozí a zkřehnutí vznikem  $\sigma$  fáze.

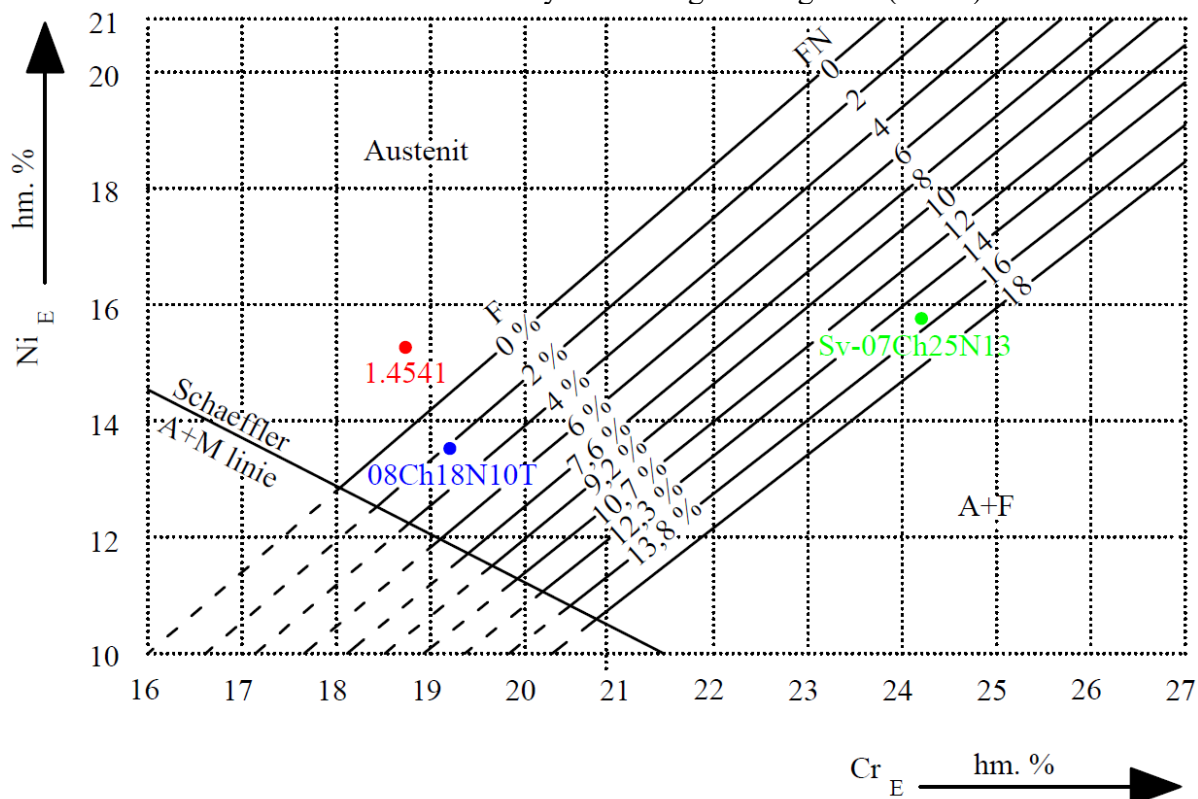
Na praskání svarového kovu mají vliv především síra a fosfor. Segregují do mezidendritických oblastí a na hranice zrn, kde vytváří nízkotavitelné fáze. Způsob krystalizace austenitických ocelí má vliv na odolnost vůči horkým trhlinám. Žádoucí je feritická struktura, která je daleko méně citlivá na vznik trhlin než austenitická a hodnota tzv. Feritového čísla  $FN \geq 3$ . Feritové číslo udává obsah  $\delta$  feritu, který eliminuje vliv fosforu. Obsah síry lze snížit vazbou na mangan.

Základní materiál 08Ch18N10T:  $FN = 2,25$ , 1.4541:  $FN = 0$ . Přídavný materiál Sv-07Ch25N13:  $FN = 15,44$ .

Ve svarových kovech se doporučuje 2–6 hm. %, v základním materiálu 3 hm. %.

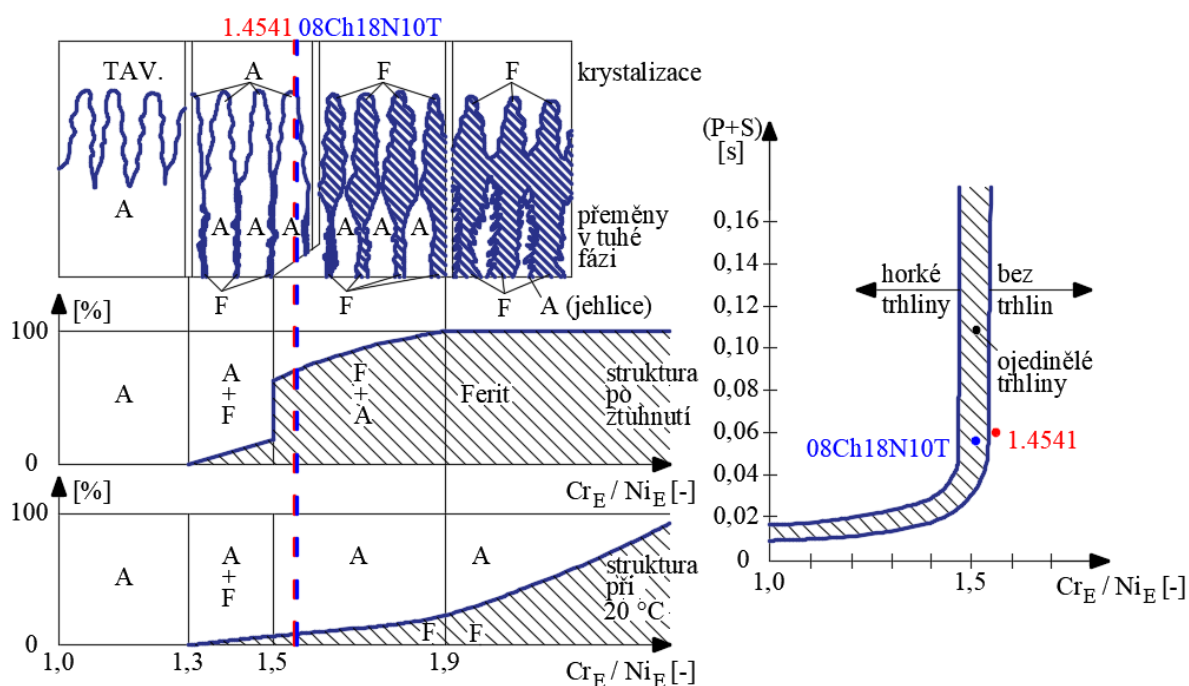


Použité austenitické ZM a PM umístěny v De Longově diagramu (obr. 6):



Obr. 6: De Longův diagram [19]

Vliv legujících prvků na výslednou strukturu a její náchylnost ke vzniku horkých trhlin lze vyčíst ze Suutalova diagramu (obr. 7). Vlastní diagram ilustruje souvislost mezi charakterem krystalizace, poměrem chromového a niklového ekvivalentu a strukturou po vychladnutí.



Obr. 7: Suutalův diagram [21]

Suutal uvádí vzorce pro chromové a niklové ekvivalenty:

$$Cr_E = Cr + 1,37 \cdot Mo + 1,5 \cdot Si + 2 \cdot Nb + 3 \cdot Ti \quad (1.3)$$

$$Ni_E = Ni + 22 \cdot C + 14,2 \cdot N + 0,3 \cdot Mn + Cu \quad (1.4)$$

Ekvivalenty vypočítané dle vztahů 1.3 a 1.4: 08Ch18N10T:  $Cr_E = 19,7$  a  $Ni_E = 12,6$ , 1.4541:  $Cr_E = 19,3$  a  $Ni_E = 12,8$ , Sv-07Ch25N13  $Cr_E = 24,1$  a  $Ni_E = 15,0$ .

Materiál 08Ch18N10T:  $Cr_E/Ni_E = 1,56$ ; mat. 1.4541:  $Cr_E/Ni_E = 1,51$ . Pro oba materiály vychází  $Cr_E/Ni_E > 1,5$ . To znamená, že primárně krystalizuje feritická fáze, ale v místech bohatých na nikl se tvoří zárodky austenitu, které prorůstají do feritu během ochlazování. Výrazně se snižuje sklon k horkým trhlinám.

Pokud by byly použity vztahy 1.1 a 1.2 aplikované v Schaefflerově a De Longově diagramu, podíly ekvivalentů by vyšly méně příznivě: 08Ch18N10T:  $Cr_E/Ni_E = 1,42$ ; 1.4541:  $Cr_E/Ni_E = 1,23$ . Při poměru  $Cr_E/Ni_E < 1,3$  je materiál 1.4541 velmi náchylný na vznik horkých trhlin; struktura je čistě austenitická. 08Ch18N10T s  $Cr_E/Ni_E < 1,3 \div 1,5$  má též velkou náchylnost, problém může nastat vlivem odmišení chromu, kdy zůstane mezi dendrity malý podíl feritu.

Mezikrystalová koroze u korozivzdorných ocelí může nastat v pásmu zcitlivění ležící v rozmezí teplot 425 až 815 °C. Základní příčina vzniku MKK je precipitace karbidů a nitridů chromu. Odolnost proti MKK lze zvýšit např. snížením obsahu uhlíku. Pro austenitickou ocel s obsahem Ni kolem 10 hm. % lze uvést vztah mezi nejvyššími obsahy chromu a uhlíku:

$$Cr \geq 80 \cdot C + 16,8 \quad (1.5)$$

Po dosazení do vztahu 1.5: pro 08Ch18N10T by měl být při stávajícím  $C = 0,061$  obsah chromu 21,68 hm. % (je 17,62 hm. %), nebo naopak obsah uhlíku max. 0,01 hm. %. Pro 1.4541 při  $C = 0,06$  obsah chromu 21,60 hm. % (je 17,24 hm. %), nebo naopak obsah uhlíku max. 0,0055 hm. %.

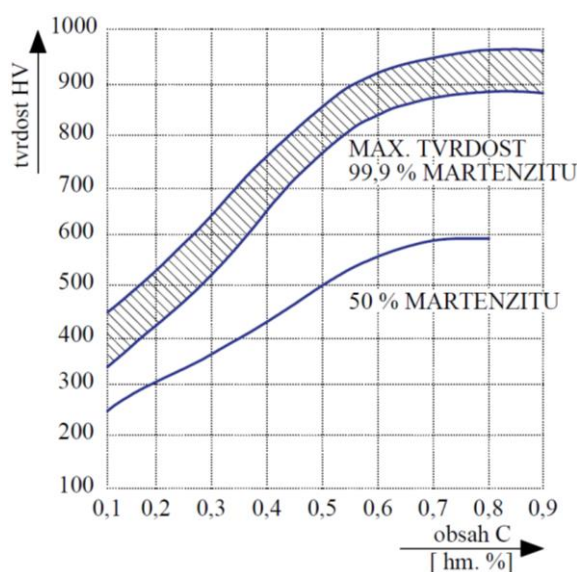
Takové snížení obsahu uhlíku by bylo velmi obtížné. Proto byly oceli použité experimentu stabilizovány titanem. Titan má větší afinitu k uhlíku než chrom. Vytváří TiC, nevznikají tak nežádoucí karbidy  $(Cr, Fe)_{23}C_6$  a  $(Cr, Fe)_7C_3$  a je zabráněno ochuzení hranic zrn o chrom. Má-li dojít ke stabilizaci, pak:

$$\frac{Ti}{C} > 4 \quad (1.6)$$

Obě použité austenitické oceli vyhovují požadovanému poměru (08Ch18N10T:  $Ti / C = 6,1$ , 1.4541:  $Ti / C = 9$ ).

Uhlíková ocel má nízkou odolnost v korozním a oxidačním prostředí, vyznačuje se výrazným snížením pevnosti při vyšších teplotách, má nízkou prokalitelnost, výrazný pokles tvrdosti při žihání (např. při žihání na snížení pnutí).

Při svařování se musí počítat s tím, že uhlík v TOO způsobuje zvýšení tvrdosti, současně snižuje plasticitu, takže vzniká vnitřní pnutí, které může vést ke vzniku trhlin. Na obr. 8 je patrná závislost tvrdosti na obsahu uhlíku způsobená výskytem martenzitu. Připouští se 350 HV (380 HV dle ČSN EN ISO 15614-1) jako maximální tvrdost svarového spoje v TOO, což odpovídá obsahu uhlíku v oceli 0,25 % a 50 % obsahu martenzitu ve struktuře. Proto je obsah uhlíku ve svařitelných ocelích omezen hodnotou



Obr. 8: Závislost tvrdosti na obsahu C [19]

$C \leq 0,25$  hm. % a není nutné zajišťovat zvláštní podmínky při svařování.

Oceli s obsahem  $C < 0,20$  % a  $CE \leq 0,45$  % s tloušťkou pod 25 mm nevyžadují při svařování použití předehřevu. Svařitelnost oceli se dále zhoršuje se zvyšující se hodnotou uhlíkového ekvivalentu CE. Jeho hodnoty charakterizují náchylnost oceli na vznik tvrdých rozpadových struktur (martenzitické, martenzitické v kombinaci s dolním bainitem) TOO ve vztahu s jejich prokalitelností, tedy náchylnost na praskání za studena – zkřehující účinek vodíku. Vzorec stanovený Mezinárodním svářečským institutem (IIW):

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (1.7)$$

Dosazením do vztahu 1.7 odpovídá uhlíkový ekvivalent pro základní materiál 12 022.1:  $CE = 0,32$ , pro P265GH:  $CE = 0,21$ .

Austenitické oceli mají lepší tažnost a houževnatost než uhlíkové a nízkolegované oceli díky své kubické plošně centrované mřížce. Také mají vyšší hodnotu tepelné roztažnosti a elektrického odporu a nižší hodnotu tepelné vodivosti (je třeba použít nižší měrný příkon než při svařování uhlíkových ocelí).

Již během svařování materiálů s rozdílnými koeficienty teplotní roztažnosti dochází k výrazné redistribuci uhlíku. Při chladnutí po svaření vznikají na rozhraní svarových spojů vysoká vnitřní napětí relaxující plastickou deformací v měkčí, odpevněné zóně. Hlavní příčiny degradace struktury a vlastností svarových spojů spočívající ve snížené strukturní stálosti jsou spojeny s:

- redistribucí uhlíku a tvorbou oduhličených a nauhličených zón,
- se změnami mechanických (popř. i fyzikálních, korozních aj.) vlastností spoje, tj. s odpevněním oduhličených zón a se zpevněním nauhličených zón důsledkem redistribuce uhlíku během tepelného zpracování spoje a při jeho exploataci za zvýšených teplot, postupnou lokalizací plastické deformace do odpevněných zón spoje při cyklických změnách teploty a zatížení, popř. i při plastickém zatížení, s vyčerpáním plasticity těchto zón a s následnou tvorbou trhlin.

## 1.1 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ [20], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34]

Svařování ocelí různorodých materiálů nestejného chemického složení a rozdílných strukturníchází vede vždy k degradaci jednoho nebo obou svařovaných materiálů z důvodu, že v přechodu materiálů do svarového kovu vzniká natavená – fúzní – zóna, která má odlišné chemické složení a tím i degradované mechanické, fyzikální (termodynamické) a chemické vlastnosti.

Vybrané způsoby svařování materiálů (označení dle EN ISO 4063):

- **Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou – 111** – metodou lze svařovat v podstatě všechny materiály. Elektroda se skládá z kovového jádra a nalisovaného obalu. Pro spoje materiálů různých struktur a pracuje-li svar do 350 °C, doporučuje se použití bazických elektrod dávající nízkolegovaný svarový kov s velmi nízkým obsahem uhlíku. Bazický obal obsahuje hlavně uhličitany vápenatý a hořčnatý a kazivec (ovlivňují metalurgické pochody při tavení a chladnutí kovu, pomáhají vytvořit strusku, která formuje kresbu tuhnutí svarového kovu a zpomaluje chladnutí svarového spoje), ferosilicium a feromangan (chrání před vypálením některých prvků, čistí (rafinují) svarový kov), železný prášek (zvýšení produktivity svařování), rutil ( $\text{TiO}_2$  usnadňuje zapalování oblouku a stabilizuje hoření). Ochranná atmosféra  $\text{CO}_2$  a zásaditý charakter strusky umožňují legovat svarový kov např. chromem a niklem. Svarový kov má velice malý obsah  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ , P a S, což zaručuje jeho houževnatost a odolnost proti vzniku trhlin. Svařuje se stejnosměrným proudem, elektroda je připojena ke kladnému pólu (nepřímá polarita), používá se krátký oblouk.
- **Obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu (MIG) – 131** – elektrický oblouk hoří mezi tavící se elektrodou ve formě drátu a základním materiálem v ochranné atmosféře inertního plynu, nejčastěji argonu, heliu, či jejich směsi. Pro svařování nelegovaných ocelí lze použít prakticky všechny typy přenosu obloukem, svařování vysokolegovaných ocelí se doporučuje impulsního způsobu svařování, také sprchový a zkratový přenos. Sprchový přenos u vysokolegovaných ocelí začíná u proudu přibližně o 20 % nižším než u nelegovaných (při použití ochranného plynu  $\text{Ar}+\text{He}+\text{O}_2$ ; korozivzdorné oceli mají především díky obsahu Cr hustou tavnou lázeň, která vytváří nežádoucí převýšení a ostrý přechod svarové housenky do základního materiálu).
- **Plazmové svařování (PAW) – 15** – koncentrovaný sloupec disociovaného a vysoce ionizovaného plynu vzniká stabilizací elektrického oblouku průchodem chlazenou tryskou, na vnitřním povrchu stěn trysky pak dochází k rekombinaci ionizovaných částic, jádro sloupce se silně přehřívá a vznikající úzký sloupec plazmového oblouku se projeví vysoce zkoncentrovanou energií. Účinnost přenosu tepla se pohybuje mezi 65–80 %. U svařování se používá závislé zapojení (přenesený oblouk) hořáku, u kterého je záporný pól připojen na wolframovou elektrodu a kladný na materiál. Pro svařování materiálů tloušťek 3,5–10,0 mm se používá tzv. keyhole welding se svařovacím proudem nad 100 A. Svařovací rychlost se dle svařované tloušťky a parametrů svařování pohybuje nejčastěji v rozmezí 15–85  $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ ; s narůstající rychlostí svařování se zvyšuje rychlost toku plazmového plynu ( $\text{Ar} + 20 \% \text{He}$  2.000  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , N 1.500–2.300  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Materiály do tloušťky 8 mm se svařují bez úkosování svarových ploch. Ve srovnání s laserovým paprskem má plazmový oblouk nižší koncentraci energie, avšak nesrovnatelně vyšší energetickou účinnost a nižší celkové provozní náklady.

- **Laserové svařování – 751** – svařování infračerveným zářením, kdy se jeho fokusací dosahuje v ohnisku na materiálu vysoká hustota energie, která dopadem koherentního svazku monochromatického záření ohřívá materiál. Svařuje se obvykle bez přídavného materiálu, dochází k minimálnímu ovlivnění ZM (malá TOO), minimální natavení ZM (vysoká koncentrace tepelné energie), vysoká rychlost svařování. Výhody (specifické pro tuto metodu) – nepřítomnost mechanického kontaktu mezi zdrojem záření a materiálem; místní ohřev a rychlé chladnutí s ohledem na vysokou energii záření a malé ohnisko; možnost svařování různých kovů a různé geometrie svarů, tradičními způsoby neproveditelné; možnost svařování v kontrolované atmosféře, průchod svazku záření opticky transparentními materiály. Vytvoření svarového spoje – svařování průchozím paprskem – keyhole – při hustotách výkonu  $10^{10}$ – $10^{13}$  W.m<sup>-2</sup> dochází k vypařování materiálu (vzniká kráter) a vedení tepla svařovaným materiálem zaručuje dostatečné natavení stěn kráteru. Absorpce laserového záření materiálem závisí na teplotě (s vzrůstající teplotou roste), vlnové délce (s klesající absorpcí roste, větší vlnová délka, větší odrazivost). Zvýšit absorpci lze zvětšením nerovnosti povrchu, barvou, povlakem s větším koeficientem absorpce, mořením, předehřevem povrchu samotným laserovým paprskem s krátkou vlnovou délkou. Materiály s nízkou tepelnou vodivostí poměrně lehce dosahují vysokých teplot v místě svaru, materiály s vysokou tepelnou vodivostí dosahují nižších maximálních teplot (teplo se odvede do teplem ovlivněné oblasti, která zde bude větší, spojovaný materiál se bude méně odpařovat; tyto materiály se dobře svařují. Rychlost ohřevu laserovým svazkem je mnohonásobně vyšší než rychlost odvodu tepla do materiálu. Na obr. 9 je zachycena hlava (fokusace svazku, ochrana optiky, přívod ochranné atmosféry) patřící svařovacímu robotu s generátorem YLS-2000 o výkonu 2 kW používaném na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd ČR v Brně.



Obr. 9: Procesní hlava robotu

- **Obloukové svařování netavící se elektrodou v inertním plynu (TIG) – 141** – oblouk hoří mezi netavící se wolframovou elektrodou základním materiálem; jako ochrana se používá inertní plyn; přídavný materiál se obvykle přidává ve formě drátu. Pracuje-li svarový kov do 350 °C, svařujeme austenitickými elektrodami (dávají plastický kov s vysokou houževnatostí). Při svařování se udržuje krátký oblouk, aby se dosáhlo úzké tepelně ovlivněné zóny; vzhledem k nízké proudové hustotě nevznikají velké průvary.

Při svařování různorodých materiálů je potřebné z důvodu co nejnižšího nalegování svarového kovu použít technologie svařování s nízkými hodnotami tepla přivedenými na jednotku délky svarového spoje. Optimální – svařování laserem, elektronovým paprskem. Pokud použijeme malé teplotní příkony, tj. svařování malými průměry elektrod, nízkými proudy a vyššími rychlostmi svařování, lze použít ruční obloukové svařování (111).

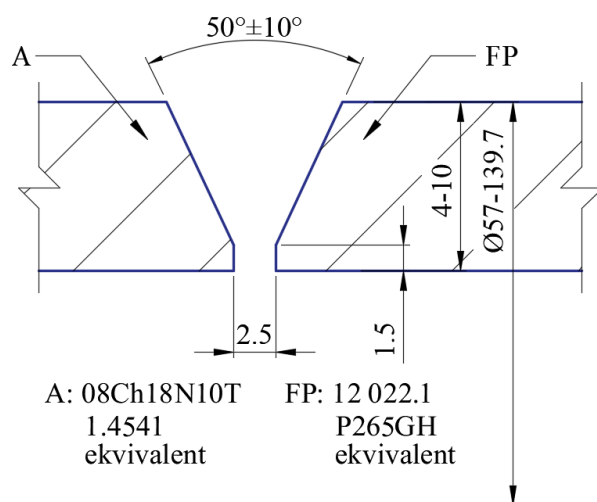
Ruční obloukové svařování se na JE používá pouze pro svařování konstrukcí a pro realizaci svarových výplní při svařování potrubí; na kořenovou vrstvu se z důvodu požadavku vysoké čistoty používá TIG.

Pro konstrukční svařování se uplatňuje i metoda MIG.

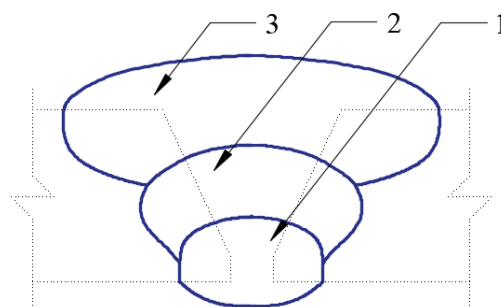
Svařování plasmou, laserem, popř. svazkem elektronů se v prostředí JE v ČR doposud nezavedlo. Jejich nasazení souvisí mj. s procesem kvalifikace těchto metod.

Svary na technologii jsou realizovány metodou TIG.

Provedení HSS na potrubí SHN (shodné místo řešené v rámci experimentu) před nástupem plné mechanizace bylo prováděno ručním způsobem na typový svařovací postup. Použití stejnosměrného proudu 90–120 A, napětí 10–11,5 V. Základní a přídavné materiály shodné s popisem uvedeným výše. Svařovací polohy PC, PH dle ČSN EN ISO 6947. Příprava svarových ploch na obr. 10, postup svařování s naznačeným počtem housenek na obr. 11.



Obr. 10: Příprava svarových ploch [34]



Obr. 11: Postup svařování [34]



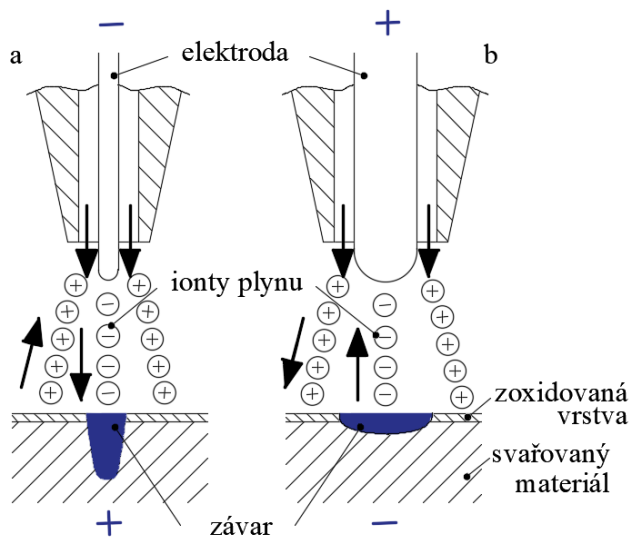
## 2 SVAŘOVÁNÍ METODOU TIG (WIG) [26]

Obloukové svařování je světově nejpoužívanější technologie svařování v objemu svařovaných konstrukcí. TIG je nejčastěji používaná metoda v oblasti svařování trubkových systémů chemických, potravinářských a energetických zařízení, a to ruční, nebo automatická verze orbitálního svařování. Při svařování hoří oblouk obklopen atmosférou inertního plynu o vysoké čistotě, která chrání elektrodu, oblouk, odtavující se kapky přídavného materiálu a tavnou lázeň proti účinkům vzdušného kyslíku a dusíku.

### 2.1 Druhy svařovacích proudů [25], [26], [35]

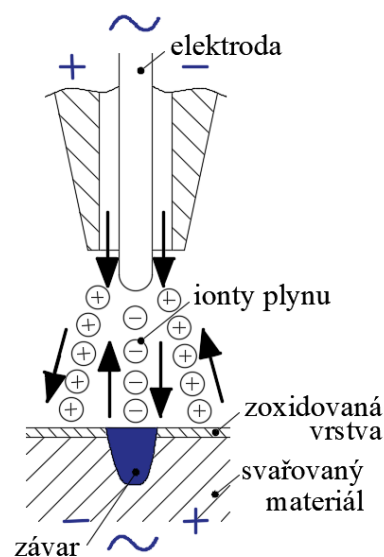
Rozlišujeme svařování:

- Stejnosemným proudem – elektroda je připojena k zápornému pólu zdroje a svařovaný materiál na kladný (přímé zapojení). Rozdělení tepla oblouku je nerovnoměrné; přibližně  $\frac{1}{3}$  tepla připadá na elektrodu a zbylé  $\frac{2}{3}$  se přenáší do základního materiálu. Elektroda není tepelně přetěžovaná a svarová lázeň má velkou hloubku závaru. Používá se pro spojování všech typů ocelí, mědi, niklu, titanu a jejich slitin. Dá se použít pro svařování hliníku v ochranné směsi plynů argonu a minimálně 75 % helia; vysoká vodivost helia dodá do svarové lázně velké množství tepla a umožní roztavení povrchových oxidů. Nepřímá polarita zapojení není z důvodu vysokého tepelného zatížení elektrody využívána a dá se výjimečně použít pro svařování tenkých svarek z hliníku nízkým proudem. Vliv polarity na závar, viz obr. 12.



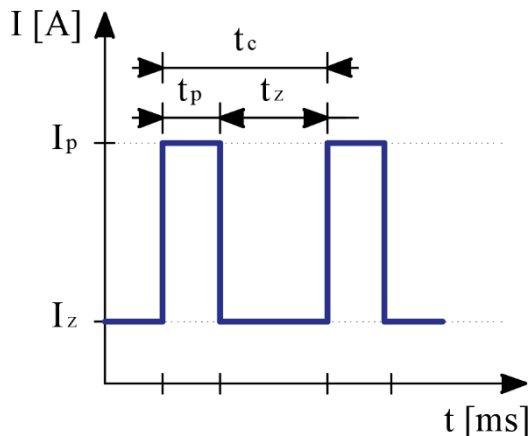
Obr. 12: Přímé (a) a nepřímé (b) zapojení [35]

- Střídavým proudem – při svařování hliníku se vytváří vrstva  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , která chrání hliník proti oxidaci. Má však vysokou teplotu tavení  $2050^\circ\text{C}$  a brání při použití stejnosměrného proudu metalurgickému spojení, poněvadž pokrývá povrch roztaveného hliníku s teplotou tavení  $658^\circ\text{C}$ . Střídavý proud se používá z důvodu čistícího účinku na svařování hliníku, hořčíku a jejich slitin. Při zapojení elektrody na kladný pól zdroje vzniká pouze malý závar. Při zapojení elektrody na záporném pólu zdroje dosahuje hloubka závaru vyšších hodnot (do lázně dopadají urychlené elektrony). Hloubka závaru naznačena na obr. 13.



Obr. 13: Svařování střídavým proudem [35]

- Impulsním proudem – během svařování se intenzita proudu mění pravidelně s časem mezi dvěma proudovými hladinami, a to proudem základním  $I_z$  a impulsním  $I_p$ . Základní proud  $I_z$  zajišťuje pouze ionizaci oblasti oblouku v čase  $t_z$ . Je-li doba základního proudu delší než dvojnásobek doby pulsu, dochází k úplnému ztuhnutí svarové lázně (výhodné pro svařování vysokolegovaných ocelí). V průběhu kratší doby lázeň neztuhne, ale zmenší svůj rozměr (vytvoří se hladký svar s plynulým přechodem do základního materiálu). Impulsní proud  $I_p$  slouží k natavení svarové lázně a tím i přídavného materiálu. Rozměry svarové lázně určuje především hodnota amplitudy impulsního proudu a doba trvání pulsu  $t_p$ . Dosahuje se velice přesné regulace svářecího režimu, dávky vneseného tepla a tvarování svarové lázně. Svary vykazují malou TOO, výborné plastické vlastnosti, nižší náchylnost na praskání a menší deformace. Čas pulsního proudu  $t_p$  a základního proudu  $t_z$  dohromady tvoří celkový čas cyklu  $t_c$  určující frekvenci svařování. Naznačení průběhu pravoúhlého impulsního proudu, viz obr. 14.



Obr. 14: Průběh impulsního proudu [26]

Používají se modulační proudy:

- dlouhé pulsy, od 1 do 10 s, pro tloušťku materiálu 4 až 6 mm
- střední pulsy s frekvencí 1 až 100 Hz, při svařování tlouštěk od 0,8 do 5 mm
- velmi krátké pulsy s frekvencí 1 až 20 MHz, pro svary titanu, speciálních ocelí a malé tloušťky 0,2 až 0,8 mm

Čím je vyšší frekvence, tím vyšší může být svařovací rychlost, jejíž hodnota zajišťuje dokonalé překrytí jednotlivých bodových svarů rovnoměrně na straně povrchu i kořene.

## 2.2 Svařovací hořáky [25], [26], [36]

Zajišťují přívod elektrického proudu k elektrodě, přívod a usměrnění ochranného plynu, fixování polohy wolframové elektrody, přívod a odvod chlazení. Přibližně do 150 A bývají hořáky chlazené procházejícím plynem, vodou chlazené do 350 až 500 A pro ruční a především strojní svařování. Trysky bývají keramické pro ruční hořáky chlazené plynem, kovové pro strojní hořáky chlazené vodou. Plynové trysky se volí podle požadované ochranné plochy. Menší tryška zajistí „kompresní efekt“ okolo oblouku a způsobí jeho větší účinnost a koncentrovanost, zatímco většího průměru zajistí lepší ochranu při nižším průtoku plynu. Pro zlepšení ochrany se používají plynová síťka (příklad na obr. 15), která mohou snížit množství ochranného plynu až o 50 %, umožní vysunutí elektrody na 15 až 20 mm. Průtok argonu závisí na svařovacím proudu a materiálu. Pro 150 A a svařování oceli je průtok  $4\div 6 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ . Hořáky mají vyměnitelné kleštiny, které zajišťují pevné upnutí a proudové napájení wolframových elektrod.



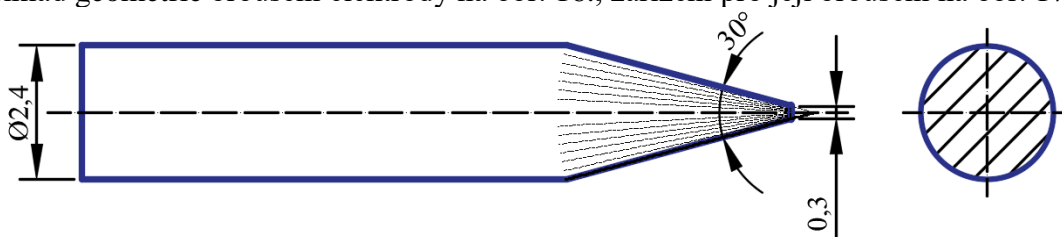
Obr. 15: Detail sítka



### 2.3 Netavící se wolframové elektrody [25], [37], [38]

Wolfram se používá na výrobu elektrod z důvodu jeho vysoké teploty tavení  $3400\text{ }^{\circ}\text{C}$  a velké emisní schopnosti. Elektrody se obohacují  $\text{ThO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{LaO}_2$  a  $\text{CeO}_2$ ; tyto oxidy zvyšují emisi elektronů, čímž se zabezpečí klidné hoření elektrického oblouku, zvýší se trvanlivost elektrod, zlepší se zapalování a elektrody vydrží i větší proudové zatížení. Průměr, druh a způsob broušení funkčního konce elektrody závisí především na druhu svařovacího proudu, polaritě na elektrodě při stejnosměrném proudu, velikosti svařovacího proudu v závislosti na druhu základního materiálu a jeho tloušťce, typu, hloubce a tvaru svarového úkosu. Při vlastním broušení je nutné orientovat elektrodu tak, aby vzniklé rýhy byly v podélném směru pro zajištění hoření oblouku z konce elektrody. Povrch broušených elektrod musí být čistý, kovově lesklý, bez trhlin, rýh a otřepů.

Příklad geometrie broušení elektrody na obr. 16., zařízení pro její broušení na obr. 17.



Obr. 16: Geometrie broušení elektrody [38]



Obr. 17: Broušení elektrody

### 2.4 Ochranné plyny [25], [37], [39]

Ochranné plyny mohou změnit svařovací proces, a to ovlivněním druhu přenosu přídatného materiálu, velikosti přechodové oblasti, obsahu legujících prvků ve svaru, povrchu housenky, vytváření kouře a rozstříku a množství různých charakteristik svaru a posunem procesních parametrů. Používají se inertní plyny:

- Argon – má malou tepelnou vodivost a relativně nízký ionizační potenciál  $15,8\text{ eV}$ . Oblouk se v Argonu dobře zapaluje, má vysokou stabilitu i při relativně velké délce, umožňuje vysokou proudovou zatížitelnost a sloupec oblouku dosahuje vysokých teplot. Hustotu má  $1,784\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , je asi  $1,4\times$  těžší než vzduch, to přispívá k velmi dobré schopnosti plynové ochrany především v poloze PA. Lze použít pro všechny svařitelné materiály.
- Helium – velmi lehký plyn s hustotou  $0,178\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , což snižuje efektivitu plynové ochrany a vyžaduje vyšší průtok plynu. Ionizační potenciál je  $24,6\text{ eV}$ , a proto se oblouk špatně zapaluje, je nestabilní při větší délce hoření. Zapalování oblouku se provádí v ochraně plynu – argonu. Vysoká tepelná vodivost zapříčiňuje velký přenos tepla v oblouku; používá se pro svařování materiálů větších tloušťek, především

hliníku a mědi včetně jejich slitin. Svařování TIG v čistém He se používá v omezeném rozsahu.

- Argon + Helium – se stoupajícím obsahem helia se zvyšuje napětí na oblouku a tepelný výkon oblouku; to se pozitivně projevuje na tvaru a rozměrech svaru. Helium ve směsi s argonem zvýší hloubku závaru a rychlost svařování, nebo lze snížit přehřev kovů s vysokou tepelnou vodivostí. Směsi se používají především pro svařování mědi a hliníku ručním nebo strojním způsobem, pro ostatní kovy se doporučují pro mechanizované svařování větších tloušťek.
- Argon + Vodík – vodík díky své tepelné vodivosti zlepšuje energetickou bilanci oblouku. Přidáním 5–10 % vodíku se redukuje oxidy a se zlepšuje čistota povrchu svaru. 10 % vodíku zlepšuje tvar a hloubku závaru i rychlost svařování o 30–50 %. Používá se pro svařování vysoce legovaných austenitických a austeniticko-feritických CrNi ocelí, nebo niklu a jeho slitin. Kombinace není vhodná pro svařování martenzitických a feritických CrNi ocelí (způsobuje praskavost za studena) a pro svařování hliníku a mědi (nebezpečí pórovitosti).
- Argon + Dusík – dusík má vyšší tepelnou vodivost a přenáší do svarové lázně větší podíl tepla. Běžně se obsah dusíku pohybuje kolem 10 %. Používá se pro svařování mědi a její slitin.
- Formovací plyn pro ochranu kořene svaru – zamezuje oxidaci kořene svaru a vysoko-vyhráté oblasti okolního základního materiálu. U vysokolegovaných austenitických ocelí a niklových slitin (nejsou náchylné na vodíkovou křehkost) se používá směs Ar + 2–10 % H<sub>2</sub> nebo N + 5–20 % H<sub>2</sub>. Ostatní materiály Ti, Zr, martenzitické a feritické oceli apod. z důvodů nebezpečí vzniku trhlin nebo pórovitosti vlivem vodíku se musí chránit inertními plyny He, Ar.

## 2.5 Přídavný materiál [25], [37], [40]

Přídavný materiál se volí podle chemického složení základního materiálu, mechanických vlastností, požadovaných vlastností svarového spoje a jeho typu. Svarový spoj musí mít stejné nebo lepší vlastnosti jako základní materiál. Není přípustná výrazně vyšší pevnost a mez kluzu svarového kovu oproti základnímu materiálu. TOO má mít stejné plastické vlastnosti jako ZM. Je nutno zabránit vysokému zvýšení tvrdosti v TOO. Příliš rozdílné vlastnosti ZM a SK mají za následek snížení jeho deformační schopnosti a menší odolnost proti únavovému i křehkému porušení.

Chemické složení PM má být stejné nebo podobné jako základní materiál. Pro dynamicky zatížené konstrukce je nutno volit PM tak, aby svarový kov měl lepší mechanické vlastnosti než ZM. Materiály citlivé na horké trhliny se svařují PM snižujícími tuto praskavost. Na svařování materiálů s vysokou odolností proti korozi je třeba použít PM stejného chemického složení a stejné čistoty jako ZM.

Pro svařování korozivzdorných ocelí stabilizovaných titanem je nutno použít PM stabilizovaný niobem z důvodu nižšího propalu při průchodu elektrickým obloukem. Při svařování uhlíkových a nízkolegovaných ocelí o různé pevnosti se PM volí podle oceli s nižší pevností, ale přehřev a další podmínky svařování podle oceli s vyšší pevností. Důvodem je dosažení ukazatele celistvosti a ukazatele mechanických vlastností svarového spoje (zabránění vzniku trhlin za studena v TOO a dostatečná tažnost a vrubová houževnatost). Při svařování ocelí rozdílných strukturních bází (např. ocel FP a A) je PM volen s ohledem na požadavek co nejbližšího součinitele délkové teplotní roztažnosti k oběma svařovaným ocelím a na zajištění strukturní stálosti, tj. zabránění difúze uhlíku do austenitického materiálu.

Přídavné materiály používané pro ruční svařování (obr. 18) a pro automatizované (drát se odvíjí z cívky), viz obr. 19.



Obr. 18: PM pro ruční svařování



Obr. 19: PM pro automat

## 2.6 Ruční svařování [25]

Tato metoda je používána pro spojování vysokolegovaných ocelí a velké skupiny neželezných kovů. Svařují se složité prostorové konstrukce, v kusové a malo-sériové výrobě. Technika ručního svařování charakterizuje polohu, pohyb hořáku a přídavného materiálu vzhledem ke svarové lázni. Důležité je, aby přídavný drát zůstal při svém pohybu v oblasti ochranného plynu, nebyl v kontaktu se vzduchem (nebezpečí oxidace ohřátého konce a zanesení oxidů do svarové lázně). Příklad ručního TIG svařování na obr. 20.

Metodou TIG se dá svařovat ve všech polohách. Povrch svaru je formován obloukem. Polohování hořáku i přídavného materiálu se mění dle typu svaru, polohy, směru svařování, složitosti a tvaru svarku, dostupnosti svaru atd. Vysunutí elektrody z keramické plynové trysky je přibližně dvojnásobek průměru elektrody pro tupé svary, u koutových svarů se vysunutí elektrody zvětšuje o 3 až 5 mm. Příprava svarových ploch se řídí především tloušťkou a druhem svařovaných materiálů.



Obr. 20: Průběh ručního svařování TIG

## 2.7 Strojní svařování, automatizace [25], [41]

Cílem je zvýšit kvalitu a užitkové vlastnosti svarových spojů (odstranění vlivu kolísání délky oblouku, nepřesnosti vedení hořáku podél svarového spoje, nepravidelné rychlosti svařování,...), zvýšení produktivity (zvýšení rychlosti svařování), snížit podíl lidské práce při nedostatku kvalifikovaných svářečů, rozšíření okruhu aplikací o svařování těžkosvařitelných kovů a materiálů malých tloušťek.

Důvody pro automatizaci metody TIG:

- svářecí oblouk lze lehko zapálit a ukončit, je stabilní
- tvar a rozměry svarové lázně jsou závislé na velikosti svařovacího proudu a rychlosti svařování; obě tyto veličiny je možné spolehlivě ovládat
- není potřeba použití taviv a nedochází k produkci strusky
- při použití pulzujícího proudu je zaručeno velmi přesné dávkování a regulace množství tepla vneseného do svaru

Významné zastoupení má použití tzv. orbitálního způsobu svařování. Během svařování jsou programovány a kontrolovány veškeré potřebné parametry jako např.:

- přívod ochranného plynu do plynové trysky hořáku
- svařovací cyklus s programováním různých úrovní proudu
- rotace svařovací hlavy
- posuv přidavného materiálu
- regulace vzdálenosti hořáku a tím i délky oblouku
- nastavení příčného pohybu hořáku

Na následující fotografii (obr. 21) je zachyceno pracoviště určené pro orbitální svařování. Nejblíže je svařovací hlava MU IV složená z motoru, pohonu, svařovací desky se servomotorem AVC OSC a upínacího zařízení. Dále přenosný generátor 300 A P6 CW s dotykovým displejem. Částečně lze vidět i šestiosé dálkové ovládání.



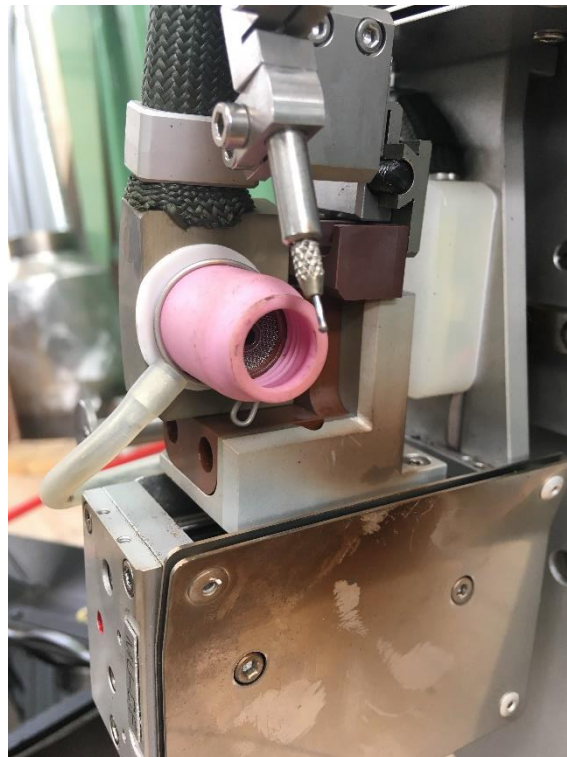
Obr. 21: Automatizované pracoviště



Svařovací deska (obr. 22) a detail hořáku s keramickou tryskou a difuzorem pro laminární plynovou ochranu (obr. 23).



Obr. 22: Svařovací deska MU IV



Obr. 23: Detail hořáku

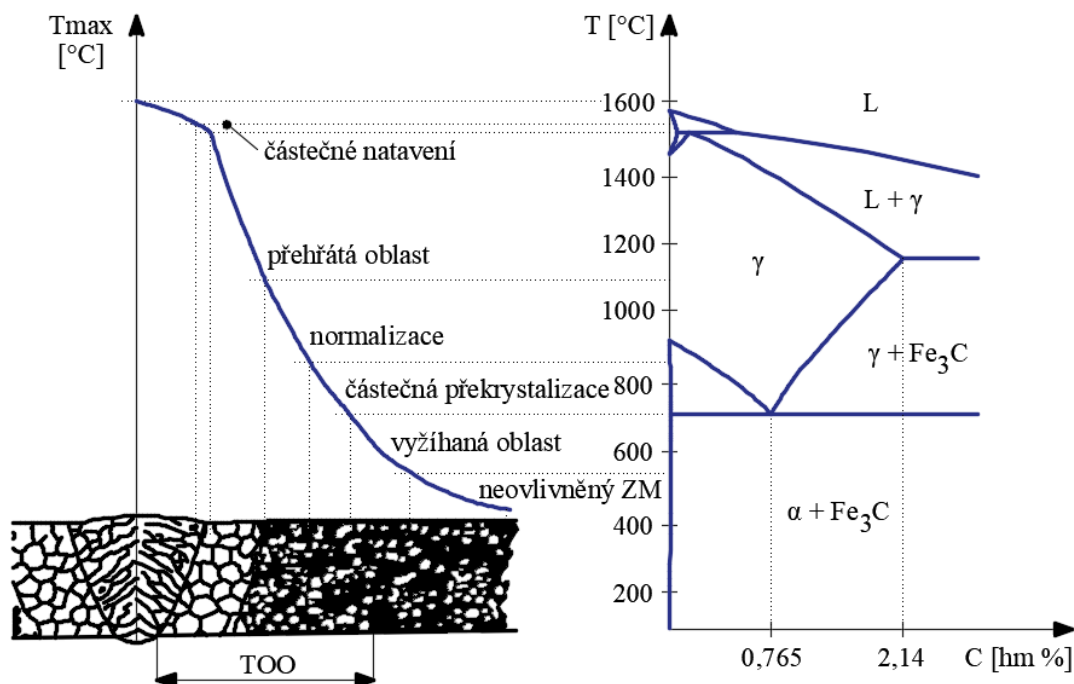
## 2.8 Vliv teploty při svařování [39], [42], [43], [44]

Příčinou vzniku teplotního cyklu je zdroj tepla, který musí působit v oblasti svarového spoje, aby se zajistila termická aktivace svařovaných povrchů. Je charakterizován oblastí ohřevu a parametry: rychlostí nebo časem ohřevu na maximální teplotu, časem výdrže nad teplotami  $Ac_1$ ,  $Ac_3$  a teplotou přehřátí  $T_{př}$ , maximální dosaženou teplotou cyklu a rychlostí ochlazování.

Podle maximální teploty  $T_{max}$  rozdělujeme svarový spoj ocelí s úplnou přeměnou  $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$  na oblasti:

- svarový kov – část spoje zahřátá nad teplotu likvidu  $T_L$
- hranice ztavení – přechodové pásmo zahřáté mezi teplotou solidu  $T_S$  a  $T_L$
- tepelně ovlivněná oblast TOO s dílčími pásmy:
  - přehřátí (hrubozrnné) v rozmezí  $T_{př}$  a  $T_S$
  - normalizace (jemnozrnné) v rozmezí  $T_{př}$  a  $Ac_3$
  - částečné překrystalizace (interkritické) v rozmezí  $Ac_1$  a  $Ac_3$

Oblasti svarového spoje (obr. 24):



Obr. 24: Vliv teplotního cyklu svařování na strukturu svarového spoje [42]

Množství tepla přivedeného do svarového spoje na jednotku jeho délky se označuje jako tepelný příkon  $Q$ . Podle ČSN EN 1011-1 se pro obloukové metody vypočítá ze vztahu:

$$Q = \frac{U \cdot I}{v \cdot 10^3}, \quad (2.1)$$

kde:  $Q$  [ $\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$ ] ... tepelný příkon

$k$  [-] ... koeficient tepelné účinnosti metody svařování (pro TIG:  $k = 0,6$ )

$U$  [V] ... napětí při svařování

$I$  [A] ... intenzita svařovacího proudu

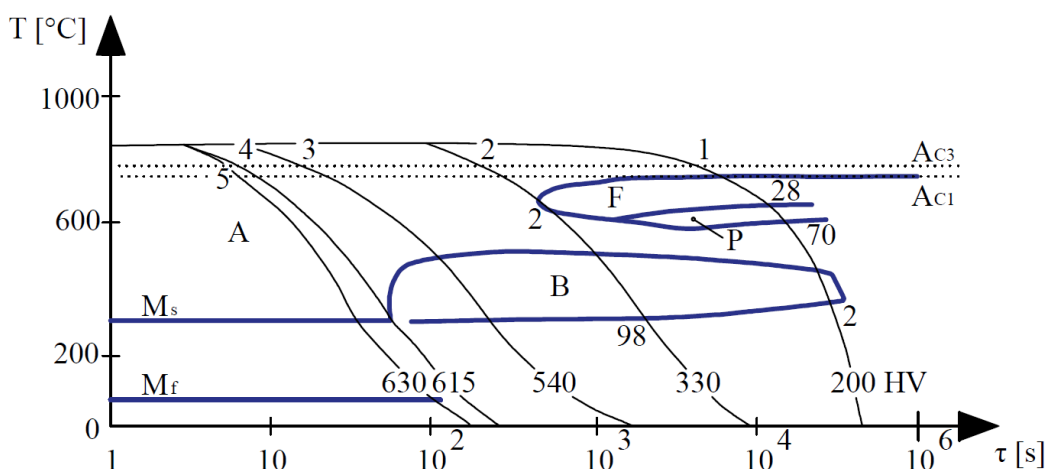
$v$  [ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ] ... rychlost svařování

S ohledem na možnost transformace  $\delta$  feritu (zvyšuje odolnost proti vzniku krystalizačních trhlin) se u austenitických ocelí doporučuje tepelný příkon max.  $1,5 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$  a teplota interpass max.  $150^\circ\text{C}$ .

Závislost rychlosti ochlazování a fázových přeměn vyjadřuje diagram anizotermického rozpadu austenitu (ARA). V oblasti svaru se může vyskytnout bainitická a martenzitická struktura podle rychlosti ochlazování svarového kovu a TOO. Vzniku nežádoucích struktur lze zabránit předeřevem, ve speciálních případech žíháním housenky další housenkou a větším tepelným příkonem při svařování.

V diagramu je zakresleno pět rychlostí ochlazování s křivkami různých přeměn. Křivka 2 zobrazuje dolní mezní rychlost zakalení.

Příklad ARA diagramu na obr. 25:



Obr 25: Diagram ARA pro podeutektoidní legované oceli [40]

## 2.9 Ochrana povrchu [45], [46], [47]

Povrchové úpravy se provádí především za účelem ochrany proti korozi, při které dochází k narušování vrstev vzájemným chemickým nebo elektrochemickým působením materiálu a okolního prostředí.

Technologie povrchových úprav kovů a slitin lze rozdělit na vytvoření:

- organických povlaků – nanášení tekutých a práškových nátěrových hmot na všechny typy podkladových materiálů
- anorganických povlaků – vytváření zejména kovových povlaků tepelnými, chemickými nebo elektrolytickými procesy

Kovové povlaky mohou být svým elektrodovým potenciálem vůči chráněnému kovu ušlechtilější (tvoří katodu; rozpuštění povlaku) nebo méně ušlechtilé (tvoří anodu; vznik vrstvy korozních produktů). Vytváření vrstev a povlaků je nejčastěji pomocí:

- elektrolytického pokovování (galvanické) – dochází k disociaci molekul kovových solí ve vodném roztoku na ionty za působení stejnosměrného proudu. Ionty kovu přechází na katodu, vodivě se připojí na materiál, na kterém se vytvoří ochranná vrstva
- chemického pokovování – kov se vylučuje z roztoku jeho solí na povrch chráněného materiálu redukcí
- žárových úprav ponorem; nástřikem, plátováním (naválcováním, nalitím, navařením, napájením) – dochází k difúzním pochodům
- depozice ve vakuu

### 3 EXPERIMENT [6]

Experimentální část se zabývá porovnáním vlastností heterogenních svarových spojů, svařených metodou 141 ručním a mechanizovaným způsobem. Rozměr trubek i použitý materiál odpovídá provedení dílenského mezikusu potrubí superhavarijního napájení parogenerátoru.

U čtyř vzorků byl použit shodný základní materiál včetně tavby, na pátý (A3\_ZK), tzv. zkušební (sloužil k „naladění parametrů“ pro mechanizované svařování), byly použité jiné materiály, ekvivalentní v souladu s NTD A.S.I., Sekce II. Všech pět vzorků bylo svařeno za pomoci stejného typu přídavného materiálu. Mezikus R1\_b se odlišuje mezioperačním broušením. Označení vzorků, použitá metoda a specifikace materiálů, viz tabulka 9. Délka jednotlivých částí trubek přibližně 200 mm (možnost napojení / opravy homogenního spoje).

Tabulka 9: Zkušební vzorky

Označení vzorku	Svařování		Základní materiál		ZM rozměry [mm]		Přídavný materiál
	Metoda	Způsob	A	FP	A	FP	
R1_b	141	ruční	08Ch18N10T	12022.1	Ø 88,9×8,0	Ø 88,9×6,3	Sv- 07Ch25N13
R2	141	ruční	08Ch18N10T	12022.1	Ø 88,9×8,0	Ø 88,9×6,3	Sv- 07Ch25N13
A1	141	automat	08Ch18N10T	12022.1	Ø 88,9×8,0	Ø 88,9×6,3	Sv- 07Ch25N13
A2	141	automat	08Ch18N10T	12022.1	Ø 88,9×8,0	Ø 88,9×6,3	Sv- 07Ch25N13
A3_ZK	141	automat	1.4541	P265GH	Ø 88,9×8,0	Ø 88,9×6,3	Sv- 07Ch25N13

#### 3.1 Použité materiály [48], [49]

Pro výrobu vzorků byly použity dva druhy základních materiálů – austenitická chromniklová a feriticko-perlitická ocel, pro zhotovení svarového spoje vysokolegovaný přídavný materiál. Základní materiál – skupina dle TNI CEN ISO/TR 15608: 1.1+8.1, skupina dle PNAE G-7-003-87:1+6.

Austenitická chromniklová ocel: 08Ch18N10T v tavbě 10473, 1.4541 tavba A04667.

Feriticko-perlitická ocel: 12022.1 tavba 20251K, P265GH tavba 97931K.

Přídavný materiál: svařovací drát Sv-07Ch25N13 tavba 103056.

Bližší specifikace materiálů uvedena v kapitole 1.

Složení ZM bylo ověřeno na dvou vzorcích pomocí spektrometru VANTA – přenosný rentgenový fluorescenční spektrometr.

Naměřené chemické složení odpovídalo rozsahu povolenému normami. Výsledky z měření uvedeny v příloze 3: Chemické složení základních materiálů (XRF spektrometr).

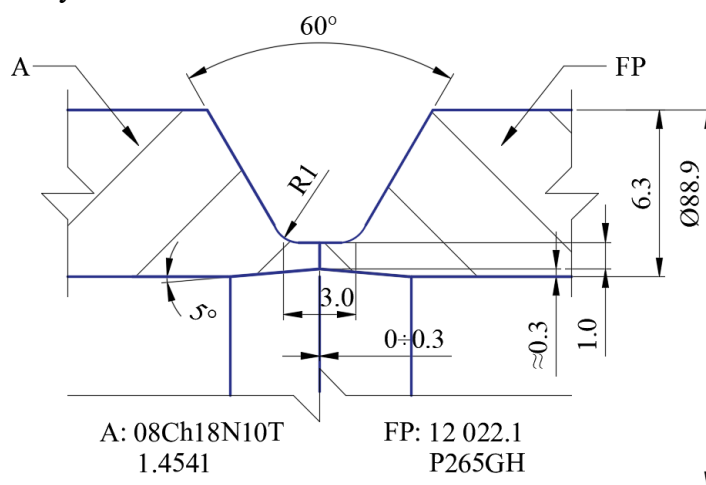


### 3.2 Příprava svarových ploch [38]

Svarové plochy byly připraveny třískovým obráběním dle nákresu na obrázku 26 v dílnách JE Dukovany. Svar tupý, úkos ve tvaru „tulipánu“, náběhy pod úhlem 5°, provedena kalibrace (svařování stejných tlouštěk materiálů).

Na obr. 27 a 28 jsou zachyceny vzorky po přípravě.

Plochy a přilehlá oblast před svařováním byly očištěny na kovový lesk, odmaštěny technickým lihem. Housenky čištěny nerezovým ocelovým kartáčem.



Obr. 26: Tvar svarového spoje



Obr. 27: Úprava svarových ploch



Obr. 28: Detail úkosu

### 3.3 Postup svařování

Svařování probíhalo dle schváleného WPS a pWPS v dílnách JE Dukovany.

#### 3.3.1 Stehování [38]

Stehování provedeno bodově metodou 141 ručně, s přídavným materiálem. Délka stehu 5–10 mm. Počet stehů 5–10 ks po obvodu.

#### 3.3.2 Ruční svařování

Vzorky R1\_b a R2 byly svařeny metodou 141 ručně se zdrojem KEMPPI MinarcTig 250MLP, hořákem TTC 220/4M stejnosměrným proudem v přímém zapojení. V tabulce 10 jsou uvedeny parametry a následují základní informace o svařování.

Tab. 10: Parametry ručního svařování u vzorků R1\_b, R2.

Vrstva	Ø drátu [mm]	I [A]	U [V]	Q* [kJ·mm <sup>-1</sup> ]
1 kořen	2	95	13	2,74
2 výplň	2,5	99	13	2,86
3 krycí	2	92	12	2,45

\* Q vypočteno dle vztahu 2.1

Svařovací poloha:	PA
Typ spoje:	BW
Ochranný plyn:	Ar 4,6 (stupeň čistoty 99,996 %)
Hubice hořáku:	Ø 24 mm
Elektroda:	WC Ø 2,4 mm, úhel vyložení 30°, otupení 0,3
Interpass:	max. 100 °C
Počet svarových vrstev:	3
Doba provedení jedné vrstvy:	přibližně 10 minut

Následující obrázky dokumentují postup svařování: obr. 29 kořenová vrstva, obr. 30 výplně (patrné broušení vrstvy), obr. 31 krycí vrstva.



Obr. 29: R1\_b kořenová vrstva



Obr. 30: R1\_b výplň



Obr. 31: R1\_b krycí vrstva

### 3.3.3 Mechanizované orbitální svařování

Vzorky A1, A3 a A3\_ZK byly svařeny metodou 141 orbitálně s plnou mechanizací stejnosměrným pulzním proudem. Svařovací zdroj POLYSOUDE P6, hlava typ: MU IV 128, podavač přídavného materiálu POLYFIL-3. V tabulce 11 jsou uvedeny parametry sledované během svařování vzorku A3\_ZK v kořenové vrstvě, v tab. 12 ve výplni a v tab. 13 v krycí vrstvě. Hodnoty tepelného příkonu jsou odečteny z programu (uvedena průměrná hodnota na vrstvu). Následují základní informace o svařování. Parametry svařování vzorků A1, A2 jsou součástí práce jako příloha 4.

Tab. 11: Parametry mechanizovaného svařování vzorku A3\_ZK – V1 kořen.

Sekvence		Ø PM	Ip	tp	Iz	tz	U	vOSH	vPPM	r
č.	[°]	[mm]	[A]	[ms]	[A]	[ms]	[V]	[mm·min <sup>-1</sup> ]	[mm·min <sup>-1</sup> ]	[mm]
S01	0-4	1	120	100	75	300	7,9	50	200	-
S02	5-29	1	140	100	90	300	7,9	50	700	-
S03	30-129	1	140	100	88	300	7,8	50	700	-
S04	130-229	1	148	100	90	300	7,7	50	800	-
S05	230-299	1	135	100	80	300	7,7	50	700	-
S06	300-355	1	135	100	80	300	7,7	50	700	-
S07	356-0	1	155	100	100	300	7,8	50	600	-

kde vOSH [mm·min<sup>-1</sup>] ... rychlost otáčení svařovací hlavyvPPM [mm·min<sup>-1</sup>] ... rychlost podávání přídavného materiálu

r [mm] ... rozkvyv

 $Q_{V1} \approx 0,40 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$ 

Tab. 12: Parametry mechanizovaného svařování vzorku A3\_ZK – V2 výplň.

Tab. 12: Parametry mechanizovaného svařování vzorků XS – ZK v Z výpn.										
Sekvence		Ø PM	Ip	tp	Iz	tz	U	vOSH	vPPM	r
č.	[°]	[mm]	[A]	[ms]	[A]	[ms]	[V]	[mm·min <sup>-1</sup> ]	[mm·min <sup>-1</sup> ]	[mm]
S01	0-4	1	180	100	110	300	8,5	50	700	-
S02	5-29	1	183	100	108	300	8,5	50	750	-
S03	30-129	1	180	100	100	300	8,5	50	700	-
S04	130-169	1	168	100	98	300	8,5	50	700	-
S05	170-299	1	155	100	95	300	8,5	50	700	-
S06	300-356	1	158	100	98	300	8,5	50	750	-
S07	357-0	1	160	100	95	300	8,5	50	600	-

 $Q_{V2} \approx 0,25 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$ 

Tab. 13: Parametry mechanizovaného svařování vzorku A3\_ZK – V3 krycí vrstva.

Sekvence		Ø PM	Ip	tp	Iz	tz	U	vOSH	vPPM	r
č.	[°]	[mm]	[A]	[ms]	[A]	[ms]	[V]	[mm·min <sup>-1</sup> ]	[mm·min <sup>-1</sup> ]	[mm]
S01	0-9	1	120	50	60	50	8,4	50	330	6
S02	10-39	1	120	50	60	50	8,4	50	300	6
S03	40-129	1	120	50	60	50	8,4	50	300	6
S04	130-199	1	120	50	60	50	8,4	50	200	6
S05	200-299	1	115	50	60	50	8,4	50	300	6
S06	300-357	1	115	50	60	50	8,4	50	300	6
S07	358-0	1	125	50	60	50	8,5	50	250	6

 $Q_{V3} \approx 0,30 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$ 

Svařovací poloha:

PK

Typ spoje:

BW

Ochranný plyn:

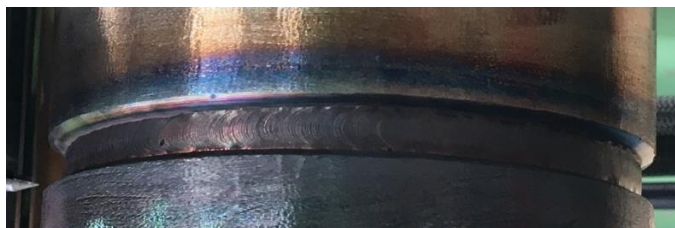
Ar 4,6 (stupeň čistoty 99,996 %)

Hubice hořáku:

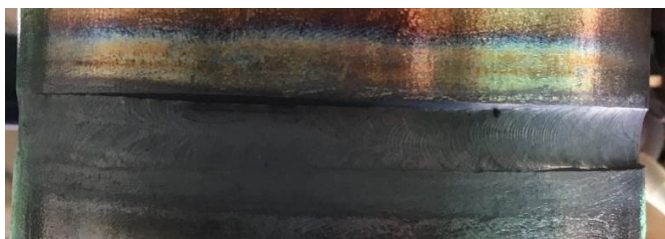
Ø 16 mm

Elektroda:	WL Ø 2,4 mm, úhel vyložení 30°, otupení 0,3
Interpass:	max. 100 °C
Počet svarových vrstev:	4 (vzorky A1, A2), 3 (vzorek A3_ZK)
Doba provedení jedné vrstvy:	6:11 minut

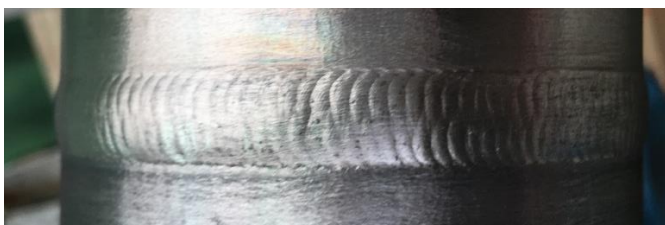
Následující obrázky ukazují postup svařování: obr. 32 kořenová vrstva, obr. 33 výplně č. 1, obr. 34 krycí vrstva.



Obr. 32: A2 kořenová vrstva



Obr. 33: A2 výplň



Obr. 34: A2 krycí vrstva

Hlavními rozdíly mezi ručním a mechanizovaným svařováním bylo množství vneseného tepla a čas potřebný pro výrobu svarového spoje. U ručního způsobu se průměrný tepelný příkon pohyboval přibližně na hodnotě  $2,67 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$  s dobou trvání asi 10 minut na jednu vrstvu, u mechanizovaného  $0,33 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$  s časem 6:11 minut.



### 3.4 Nedestruktivní kontroly [5], [50], [51]

Defektoskopické metody slouží ke zjišťování povrchových a vnitřních vad, popřípadě zobrazení jejich indikací.

Použití následujících metod vychází z požadavků TPE 10-40/1771/2014-JE Všeobecné technické podmínky pro montážní svařování potrubí elektráren typu VVER, které představují výňatek z původních předpisů PK 1514-72 a OP 1513-72. Svarové spoje jsou zařazeny do kategorie IIA. V TPE jsou uvedena i kritéria hodnocení vad.

NDT probíhaly v dílnách JE Temelín. Teplota prostředí 23,4 °C, intenzita osvětlení 1200 luxů.

#### 3.4.1 VT (vizuální kontrola) [52]

Provádí se podle všeobecných zásad uvedených v ČSN EN ISO 17637. Požadavek 100 %.

Kontrola neodhalila vady.

#### 3.4.2 PT (kapilární zkouška) [50], [53]

Zkouška provedena způsobem barevné indikace. Metody kapilárních zkoušek jsou uvedeny v ČSN EN ISO 3452-1. Požadavek 100 % + 20 mm (dle PK 1514-72).

- PT vnějšího povrchu na celistvých vzorcích před RT a UT-PA (obr. 35 po nanesení penetrantu, obr. 36 vývojky) – vzorky bez vad.



Obr. 35: PT – penetrant

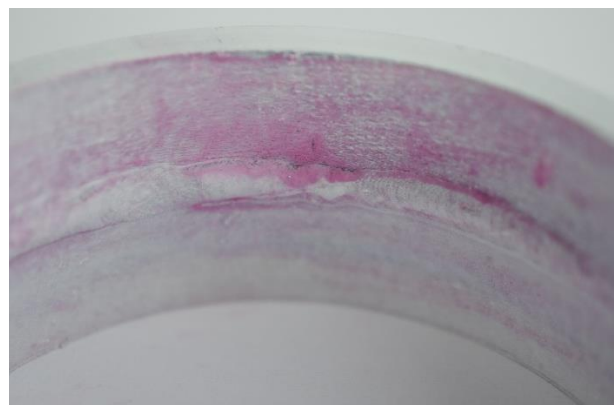


Obr. 36: PT – vývojka

- PT vnitřního povrchu na vyříznutých prstencích (obr. 37 A2 prstenec, obr. 38 A2 po nanesení vývojky): R1\_b, R2, A3 – bez vad, A2 – indikace studeného spoje (nepřípustná vada)



Obr. 37: A2 – vyříznutý prstenec



Obr. 38: A2 – indikace studeného spoje

Pozn.: vzorek A1 nebyl podroben DT. Proto na něm není provedena PT vnitřního povrchu.

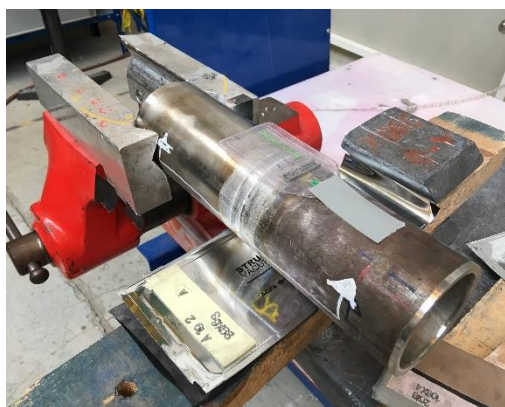
### 3.4.3 RT (prozařovací zkouška) [50], [54], [55], [56]

Radiografického zkoušení za použití filmu se provádí přednostně dle ČSN EN ISO 17636- 1. Požadavek 100 %.

V souladu s normou (nikoli s PK 1514-72; PK předepisují více pozic k prozáření) byly vzorky rentgenovány z míst A a B za pomoci rentgenky. Vzdálenost zdroj – film 1000 mm, napětí  $U = 200 \text{ kV}$ , proud  $I = 4 \text{ mA}$ , doba expozice 3:02 min. Pro určení jakosti radiogramu se na vzorky umísťuje měrka jakosti obrazu dle ČSN EN ISO 19232-1 typ W10FE ISO. Během vyhodnocování se kontroluje rozeznatelnost nejmenšího patrného drátku a stupeň optické denzity (zčernání filmu) D.

Fotografie z probíhající instrumentace zkoušky na obr. 39 a obr. 40.

Vyhodnocení zkoušky uvedeno v tabulce 14.



Obr. 39: Přípravovaný vzorek



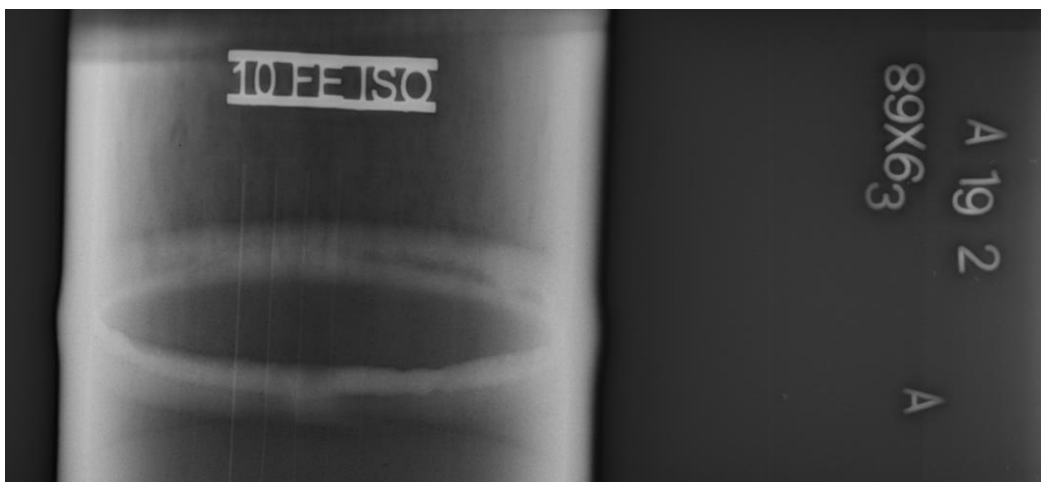
Obr. 40: Pracoviště se zářičem

Tab. 14: Výsledky RT.

Označení vzorku	Viditelný drátek		Stupeň zčernání		Vada	
	pozice A	pozice B	pozice A	pozice B	pozice A	pozice B
R1_b	15	15	2,4-3,8	2,4-3,9	-	-
R2	15	15	2,4-4,1	2,5-4,0	2011 pór (0,4 mm)	2011 pór (0,8 mm)
A1	15	15	2,8-4,0	2,5-4,0	-	2011 pór (0,8 mm), rýha v TOO
A2	14	15	2,4-3,9	2,5-3,8	vtlačený kořen	vtlačený kořen
A3_ZK	15	15	2,7-4,2	2,6-4,2	-	514 nepravidelný povrch, otlaky v TOO



Na obr. 41 je zachycen vzorek A2; vtláčený kořen zobrazený z pozice A.



Obr. 41: RT indikace vtláčeného kořene

Vady značeny dle ČSN EN 5817; vyhodnoceny dle PK 1514-72. Existence vady 514 se připouští, vada 2011 je přípustná do velikosti 1 mm. Otlaky a rýha v TOO jsou vady nepřipustné, které ale nebyly způsobeny v průběhu svařování. Pravděpodobně k nim došlo během přípravy svarových ploch. U vzorku A2 indikován „vtlačený kořen“, který nevykazuje úbytek materiálu pod úroveň základního (nevyhodnoceno jako nepřipustná vada).

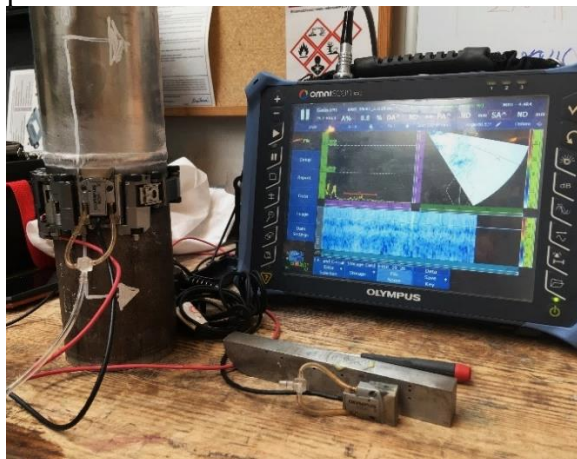
Rozdíl ve výskytu pórovitosti u vzorků R1\_b a R2 může být způsoben tím, že u vzorku R1\_b byla provedeno mezioperační broušení. Snížila se drsnost povrchu, eventuální odstranění nečistot z housenky.

#### 3.4.4 UT-PA (ultrazvuková zkouška – Phased Array) [57]

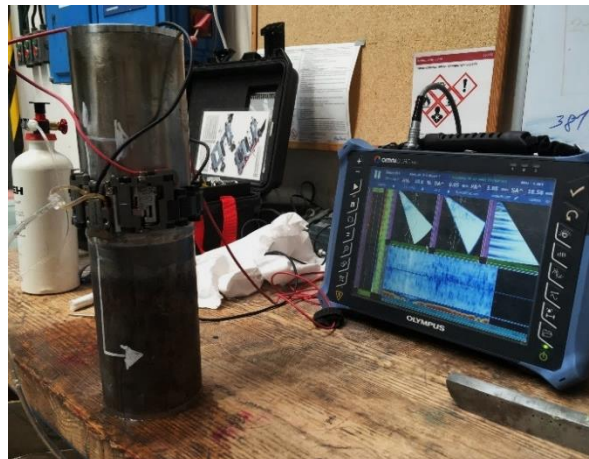
Svary potrubí se zkoušejí ultrazvukem podle ČSN EN ISO 16810. Požadavek 100 %.

Zařízení OMNISCAN MX 32/128 PR, manipulátor Circ-it, zaoblený klínek OLYMPUS SA15-N60S A0D4, sonda 10 MHz: OLYMPUS 10CCEV 35-32, sonda 5 MHz: OLYMPUS 5CCEV 35-32. Pro kalibraci použita jako vazební médium vazelína, pro zkoušku voda. Citlivost pro detekci nastavena na 0,3 mm.

Sonda 10 MHz pro kontrolu ze strany feriticko-perlitického materiálu, snímání v jedné skupině s rozevřením svazku 35–80° (průběh na obr. 42). Sonda 5 MHz ze strany austenitického materiálu, snímání ve dvou skupinách s rozevřením svazků 35–60° a 50–75° (průběh na obr. 43). Důvod pro použití dvou typů sond je různá struktura materiálů a možnosti jejich prozvučení.

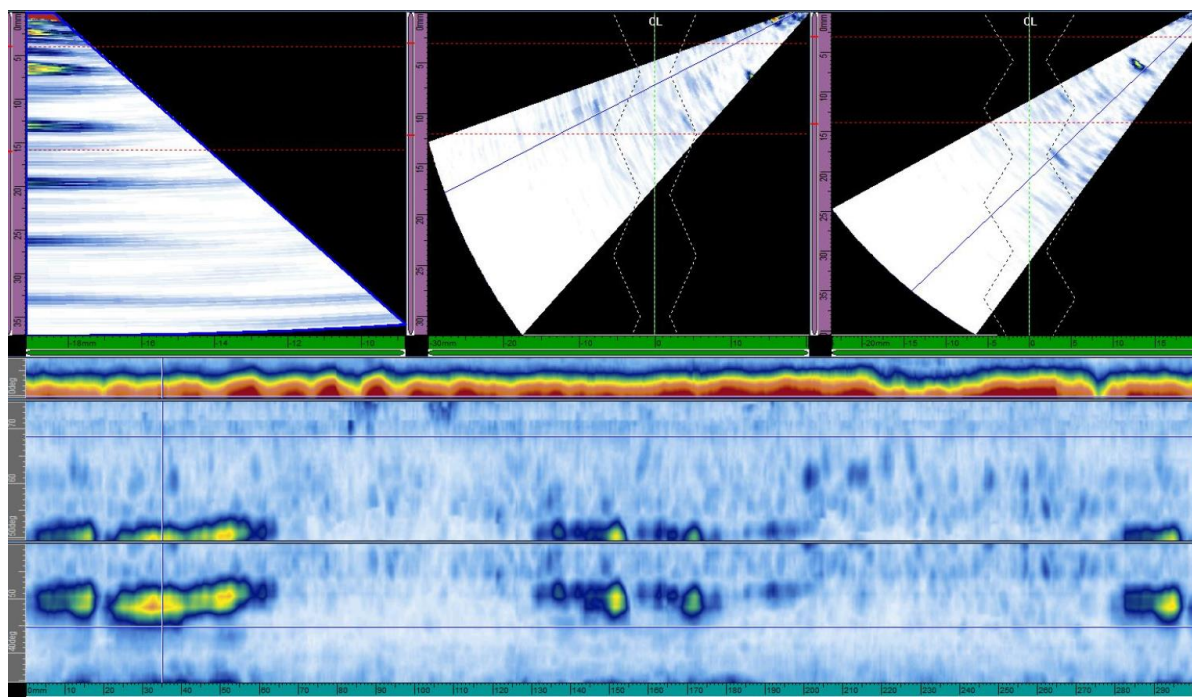


Obr. 42: UT-PA na FP materiálu



Obr. 43: UT-PA na A materiálu

Detekována indikace u vzorku A3\_ZK označena jako zábrus (obr. 44). Stejnou vadu objevila RT, viz kap. 3.4.3, otlaky v TOO). Ostatní vzorky bez indikací.



Obr. 44: UT-PA indikace „zábrusu“ u A3\_ZK ze strany austenitu

Po NDT byl vyřazen vzorek A1.



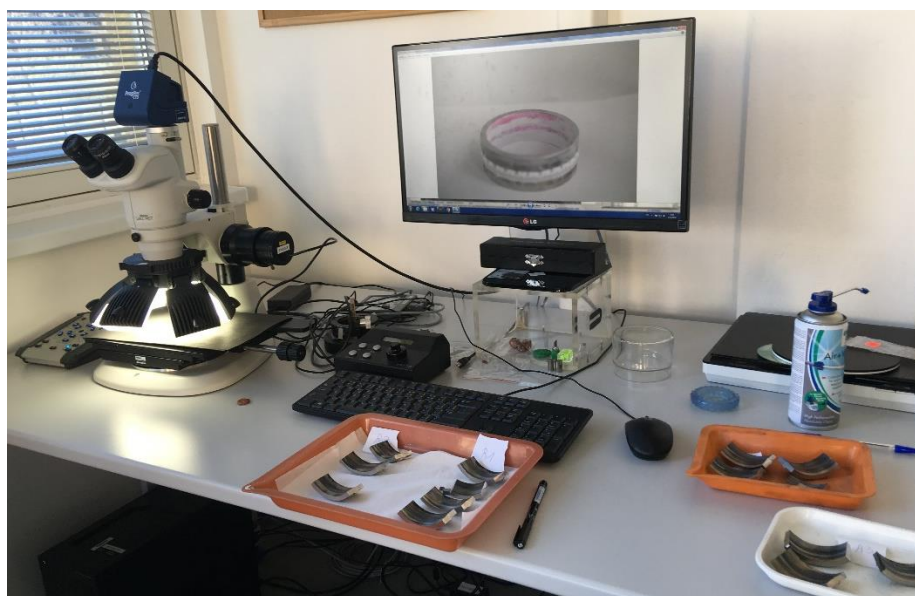
### 3.5 Destruktivní kontroly

Předcházející NDT (mimo vnitřní PT) se běžně používají před nasazením mezikusu do provozu. Následující rozbor byl do experimentu zařazen z důvodu doplnění vizuálních kontrol a zkoumání změn, které materiál prodělá během procesu svařování. Rozbor byl proveden na vzorcích R1\_b, R2, A2, A3\_ZK v prostorách ÚJV Řež.

Ze vzorků byly nejdříve odebrány jednotlivé prstence se svarovým kovem a přibližně 20 mm na každou stranu materiálů (ilustrativní obr. 37: A2 – vyříznutý prstenec v části 3.4.2). Na metalografické pile Struers Secotom 50 byly vzorky za použití řezného kotouče obsahující korund (Aluminium Oxide Cut-off Wheel 30A20) děleny na čtvrtiny.

#### 3.5.1 Stereometrická kontrola vnitřního povrchu [42], [56], [58]

Vnitřní povrch dělených vzorků byl zkoumán na stereomikroskopu NIKON SMZ 745T (obr. 45 zobrazuje pracoviště).



Obr. 45: Pracoviště se stereomikroskopem

Hodnocení:

- R1\_b – vykazuje nepravidelnou šířku kořene (513), viz obr. 46



Obr. 46: R1\_b kořen pod stereomikroskopem

- R2 – nepravidelná šířka kořene (513), viz obr. 47, krystalizační trhliny (obr. 48)



Obr. 47: R2 kořen pod stereomikroskopem



Obr. 48: R2 krystalizační trhliny

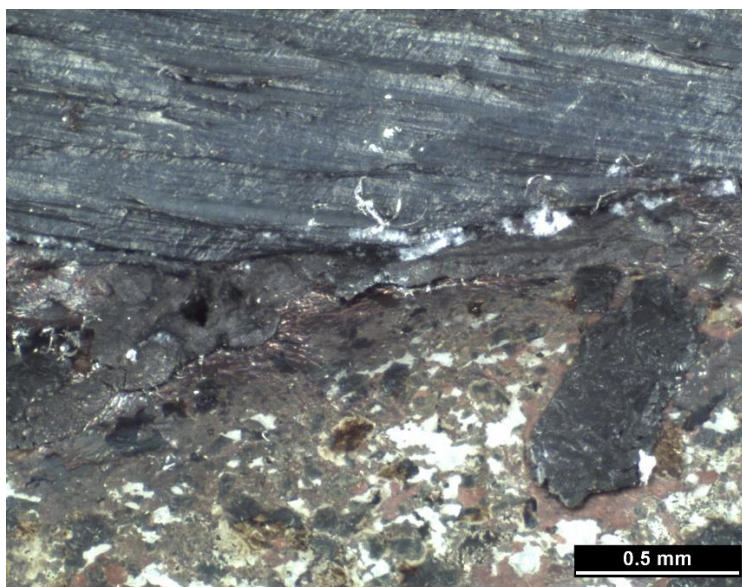
- A2 – nepravidelná šířka kořene (513), studený spoj (4013), pórovitost kořene (516), kráterová staženina (2024), oxidický povlak; kořen vzorku na obr. 49



Obr. 49: A2 kořen pod stereomikroskopem



Zvětšení oxidického povlaku na obr. 50:

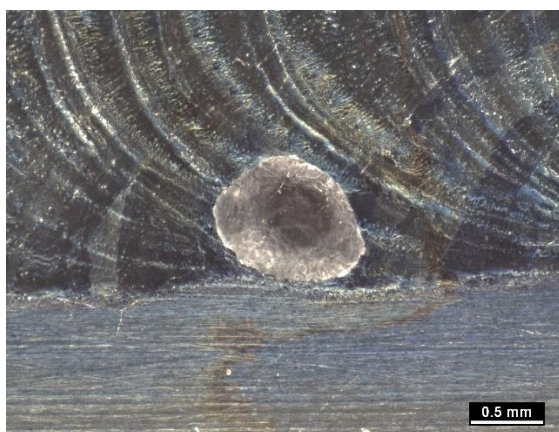


Obr. 50: A2 detail oxidického povlaku

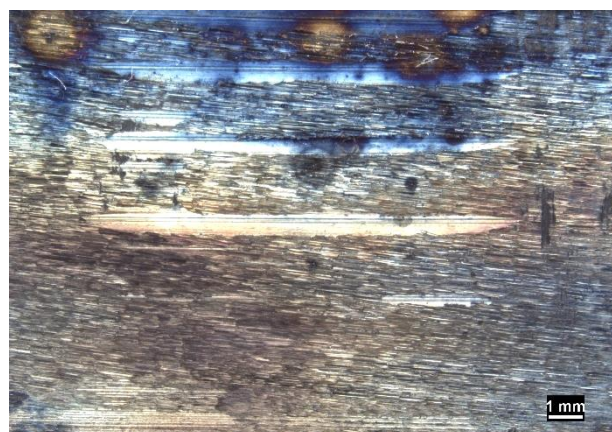
- A3 – pravidelný kořen, viz obr 51, rozstřík (602) – detail na obr 52, indikace vad z RT i UT-PA typu rýhy v TOO (délka přibližně 13 mm) na obr. 53



Obr. 51: A3\_ZK kořen pod stereomikroskopem



Obr. 52: A3\_ZK rozstřík



Obr. 53: A3\_ZK rýha v TOO

Nepravidelná šířka kořene u vzorků svařených ručně je dána způsobem svařování. Za výskyt krystalizačních trhlinek u vzorku R2 je zodpovědná dendritická krystalizace svarového kovu. Hrubší (delší) dendrity snížily jeho houževnatost a plastické vlastnosti. Příčinou může být větší rychlost svařování.

Nepravidelná šířka kořene vzorku A2 se objevila u bodu počátku svařování. Pórovitost kořene prakticky po celém jeho obvodu. U vady typu studeného spoje (indikace již při PT



vnitřní) došlo k nedokonalému tavnému spojení svarového kovu a základního materiálu např. z důvodu nedokonalé přípravy svarových ploch (velká drsnost). Oxidický povlak se vyskytuje zřejmě v oblastech stehů; důvodem bude nedostatečná ochrana plynem během stehování, která se projevuje i u vzorku R2.

### 3.5.2 Metalografie [22], [59], [60], [61]

Po provedené stereometrii byly metalografickou pilou odděleny části svařenců pro další pozorování na světelném mikroskopu NIKON Eclipse MA200 (na obr. 54 zobrazeno pracoviště).



Obr. 54: Pracoviště s optickým mikroskopem

Vzorky byly zality do samotuhnoucí pryskyřice, broušeny a leštěny. V této fázi bylo prohlédnuto rozhraní feriticko-perlitického materiálu a svarového kovu. Následně byly vzorky leptány 2 % roztokem Nitalu (kyselina dusičná). Nital umožnil pozorovat strukturu FP materiálu a rozlišit změny ve struktuře TOO. Zrna austenitického materiálu se zobrazila až po elektrolytickém leptání 10 % kyselinou šřavelovou.

Srovnání struktur:

- TOO na straně FP materiálu – obr. 55 ručně (průměrná velikost 5,5–6 mm), obr. 56 automat (průměrná velikost 3,5–5 mm)



Obr. 55: R1\_b – TOO; nital

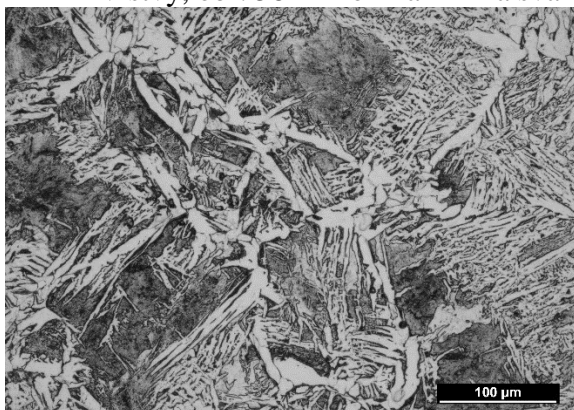


Obr. 56: A3\_ZK – TOO; nital

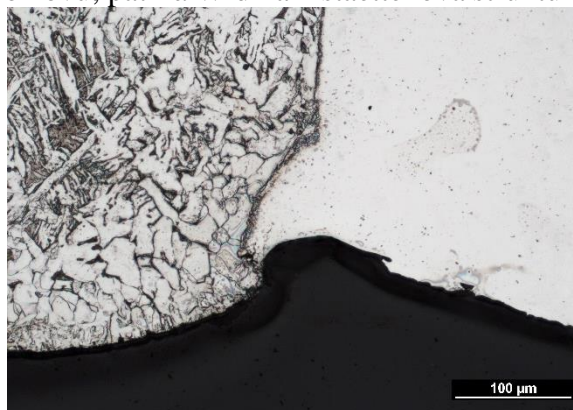
TOO na straně austenitického materiálu u ručních vzorků 1,1–1,4 mm, svařených automatem 0,8–1,7 mm.



- Přehřátá oblast (PO) na straně mat. FP – ručně – obr. 57 R2 rozhraní krycí a výplňové vrstvy, obr. 58 R2 rozhraní FP a svarového kovu; patrná Widmannstaettenova struktura

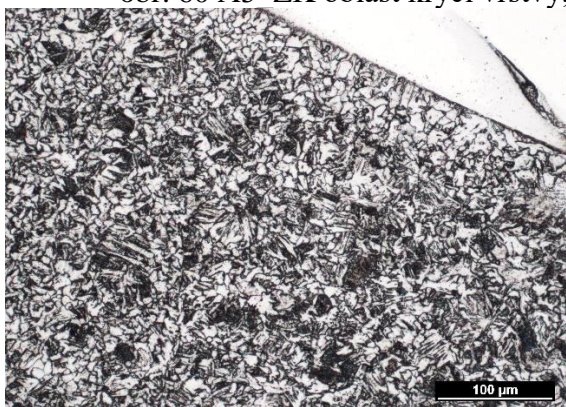


Obr. 57: Widmann. struktura; nital

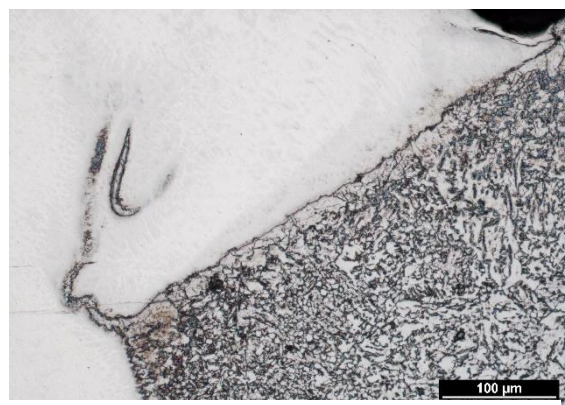


Obr. 58: R2 PO v oblasti kořene; nital

- Přehřátá oblast (PO) na straně mat. FP – automat – obr. 59 A2 oblast krycí vrstvy, obr. 60 A3\_ZK oblast krycí vrstvy; patrné síťoví až Widmannstaettenova struktura



Obr. 59: A2 PO v krycí vrstvě; nital



Obr. 60: A3\_ZK PO v krycí vrstvě; nital

- Makrostruktura svaru – obr. 61 R1\_b ručně, obr. 62 A3\_ZK automat (viditelný rozkvyv při svařování krycí vrstvy)



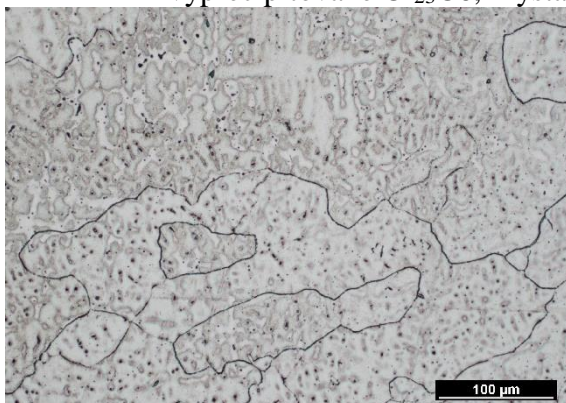
Obr. 61: R1\_b makro svaru; šťavel



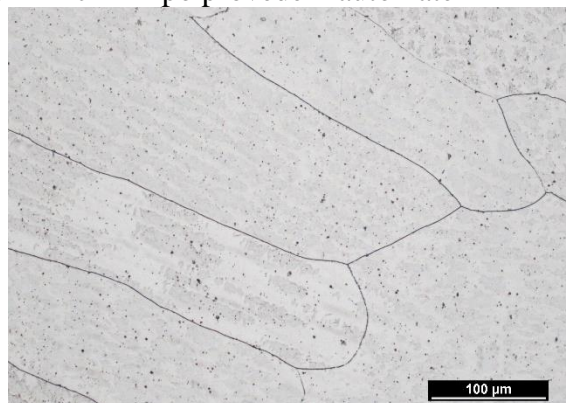
Obr. 62: A3\_ZK makro svaru; šťavel



- Kořen svarového kovu (SK) – obr. 63 R1\_b ručně, obr. 64 A2 automat; na hranicích zrn vyprecipitované  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ , krystalizace větších zrn po provedení automatickem

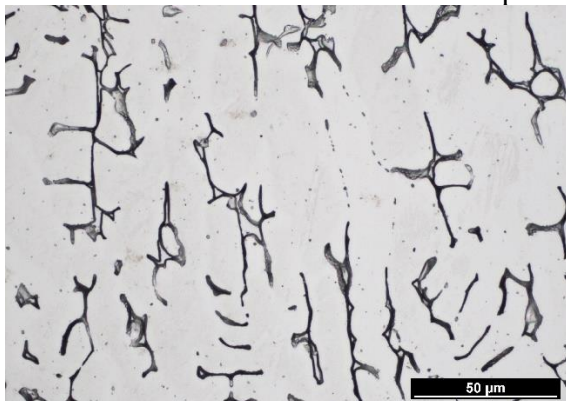


Obr. 63: R1\_b kořen SK; šřavel

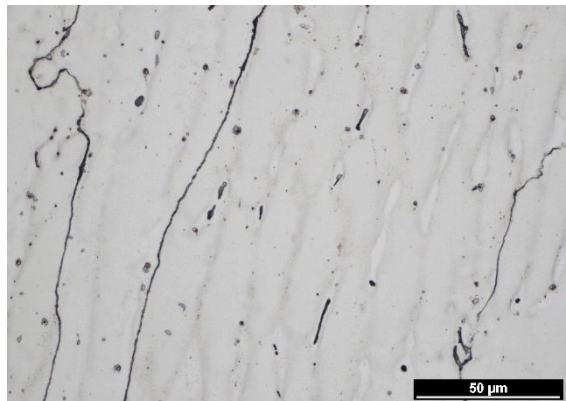


Obr. 64: A2 kořen SK; šřavel

- Výplň svarového kovu (SK) – obr. 65 R1\_b ručně, obr. 66 A2 automat; vyplnění dendritů  $\delta$  feritem u ručního způsobu svařování

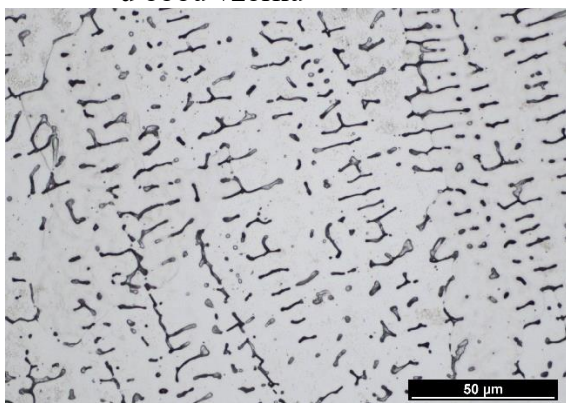


Obr. 65: R1\_b výplň SK; šřavel

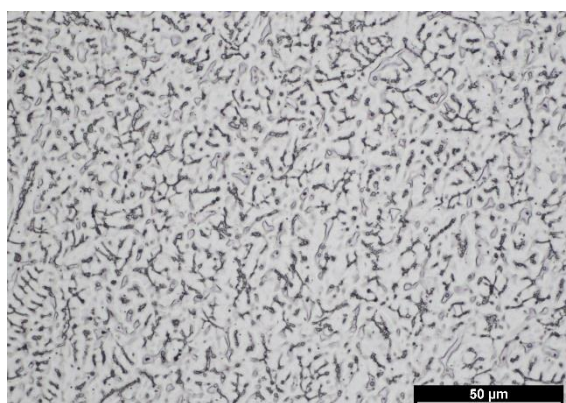


Obr. 66: A2 výplň SK; šřavel

- Krycí vrstva svarového kovu (SK) – obr. 67 R1\_b ručně, obr. 68 A2 automat;  $\delta$  ferit u obou vzorků



Obr. 67: R1\_b krycí vrstva SK; šřavel



Obr. 68: A2 krycí vrstva SK; šřavel



- Promíšení na rozhraní základního FP materiálu a SK – obr. 69 přechod krycí a výplňové vrstvy u vzorku R1\_b, obr. 70 A2 v oblasti kořene



Obr. 69: R1\_b promíšení; šťavel

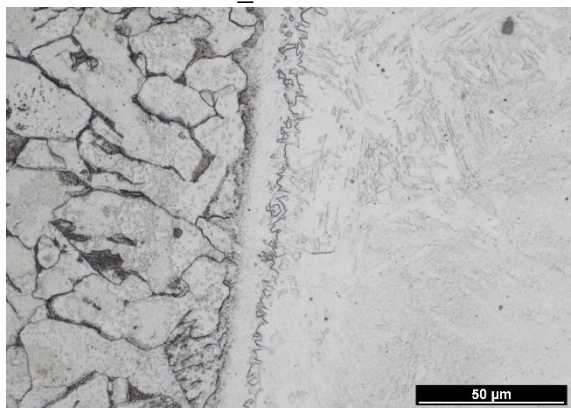


Obr. 70: A3\_ZK promíšení; šťavel

- Oblast ztavení na rozhraní základního FP materiálu a SK – obr. 71 pásmo základních struktur u vzorku R1\_b, obr. 72 detail pásma karbidů u R1\_b



Obr. 71: R1\_b základné struktury; šťavel



Obr. 72: R1\_b pásmo karbidů; šťavel

Větší rozsah TOO u „ručních“ vzorků způsobilo množství vneseného tepla během svařování. Vnesené teplo a rychlost ochlazování má za následek i rozdílnost v oblasti hrubozrnných struktur. Zatímco u vzorků R1\_b i R2 je patrná Widmannstaettenova struktura vedoucí přes celou přehřátou oblast, u A2 a A3\_ZK je viditelný rozsah daleko menší a pouze v úrovni krycí vrstvy svaru. Důvodem je pomalejší pokles teploty a nižší rychlost difúze při ručním způsobu svařování.

Při pozorování struktur svarového kovu jsou v kořenové části u obou typů vzorků zřetelné karbidy vyloučené na hranicích zrn. Zrna, obzvláště u A2 a A3\_ZK, jsou velká a mají vzhled spíše zrn feritických. Ani u jednoho ze vzorků nebyl v této části svarového kovu objeven  $\delta$  ferit.

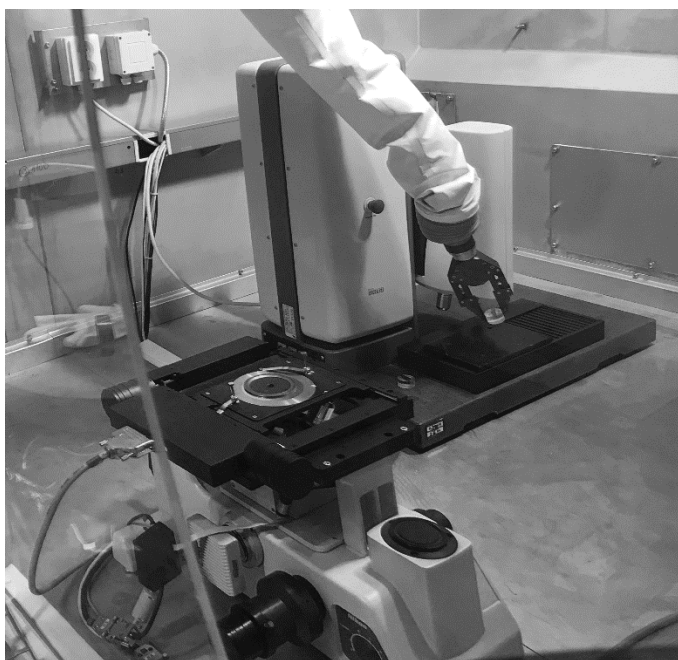
Výplňové a krycí vrstvy svarového kovu u R1\_b a R2 krystalizovaly ve formě dendritů, které rostly ve směru odvodu tepla. V mezidendritických prostorech se nacházel  $\delta$  ferit. Vzorky A2 a A3\_ZK krystalizovaly spíše celulárně kvůli menšímu teplotnímu gradientu, resp. menšímu podchlazení. Celulární struktura je typická pro svařky zhotovené pulsním způsobem.

Rozhraní FP materiálu a svarového kovu vykazovalo oblasti se základními strukturami, pásma oduhličení, pásma podtavení, v blízkosti pásma promíšení lokální výskyt hrubých feritických zrn.

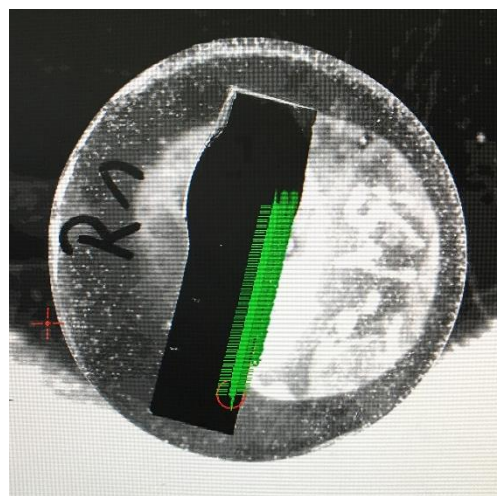
Struktury vzorků R1\_b, R2, A2, A3\_ZK uvedeny v přílohách 5–8.

### 3.5.3 Mikrotvrdomost [62]

Od základního uhlíkového materiálu přes TOO až po část svarového kovu bylo provedeno měření mikrotvrdomosti HV<sub>0,1</sub> dle Vickerse (ČSN EN ISO 6507-1) za pomoci mikrotvrdoměru Struers DuraScan 70 (obr. 73). Měření proběhlo ve dvou řadách, a to přibližně 2 mm od úrovně koruny a 2 mm od kořene (obr. 74) svaru. Vpichy jsou od sebe vzdáleny 0,2 mm, zatěžovací síla 0,98 N. Naměřené hodnoty uloženy v přílohách 9–12.



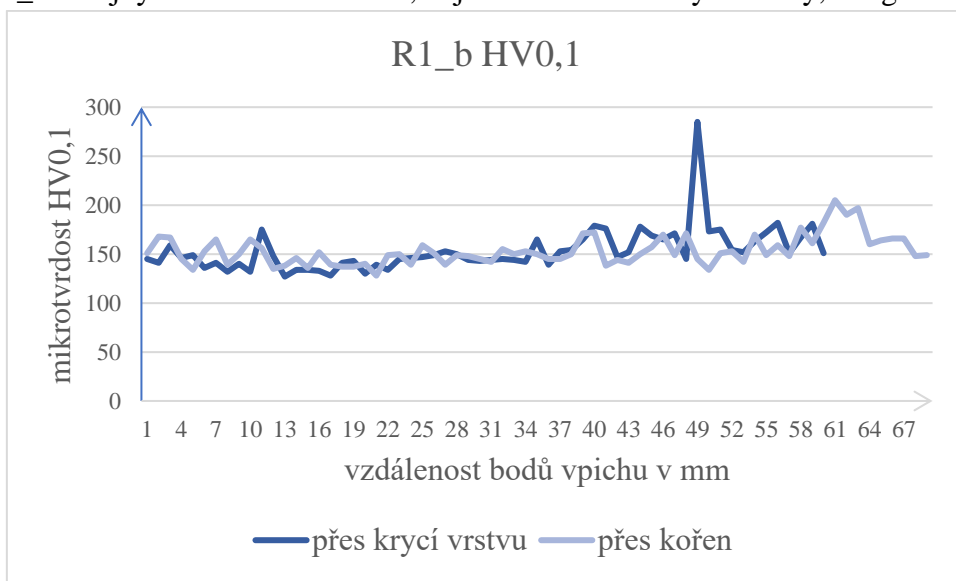
Obr. 73: Mikrotvrdoměr DuraScan 70



Obr. 74: Vpichy v úrovni kořene

Hodnocení:

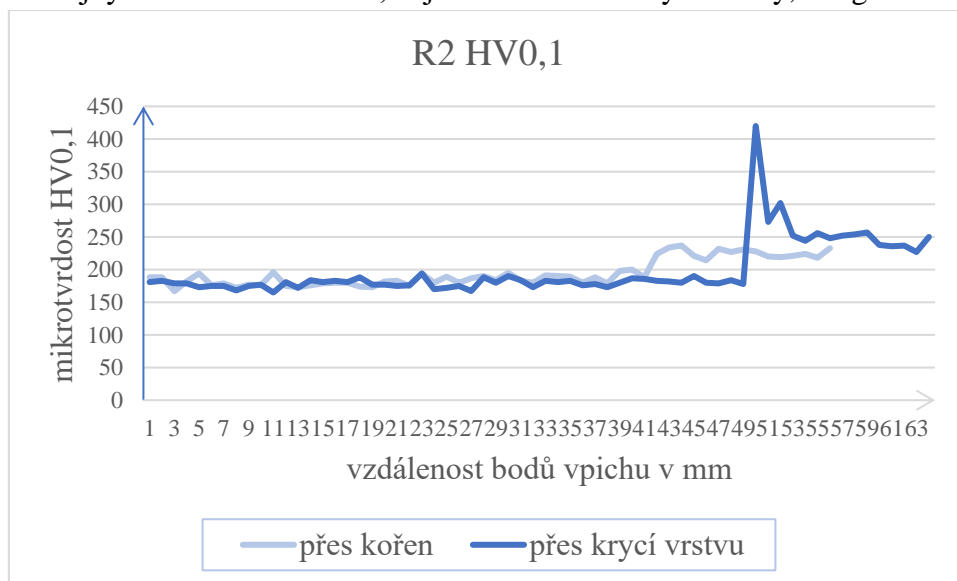
- R1\_b – nejvyšší tvrdost 285 HV<sub>0,1</sub> zjištěna v oblasti krycí vrstvy, viz graf 1



Graf 1: R1\_b průběhy mikrotvrdomostí

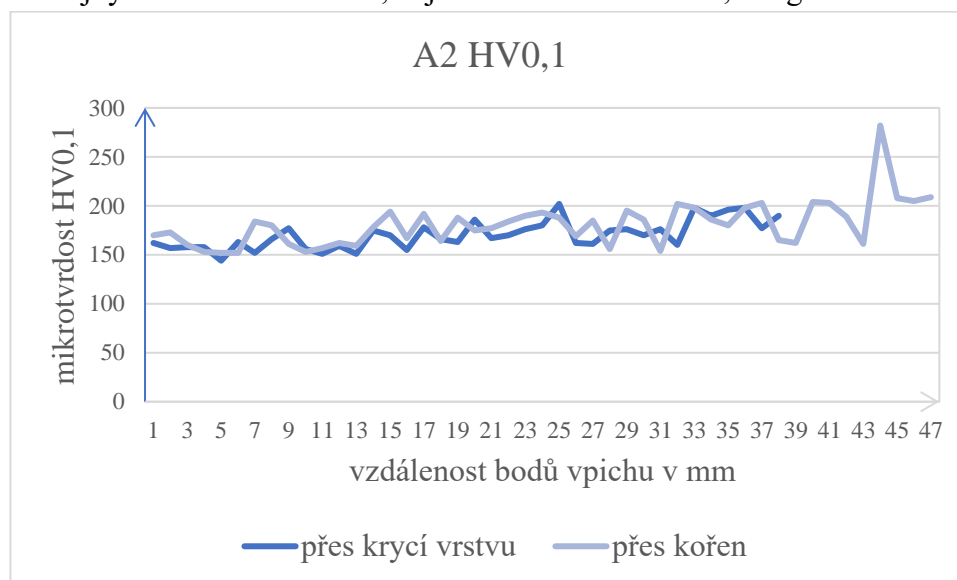


- R2 – nejvyšší tvrdost 420 HV<sub>0,1</sub> zjištěna v oblasti krycí vrstvy, viz graf 2



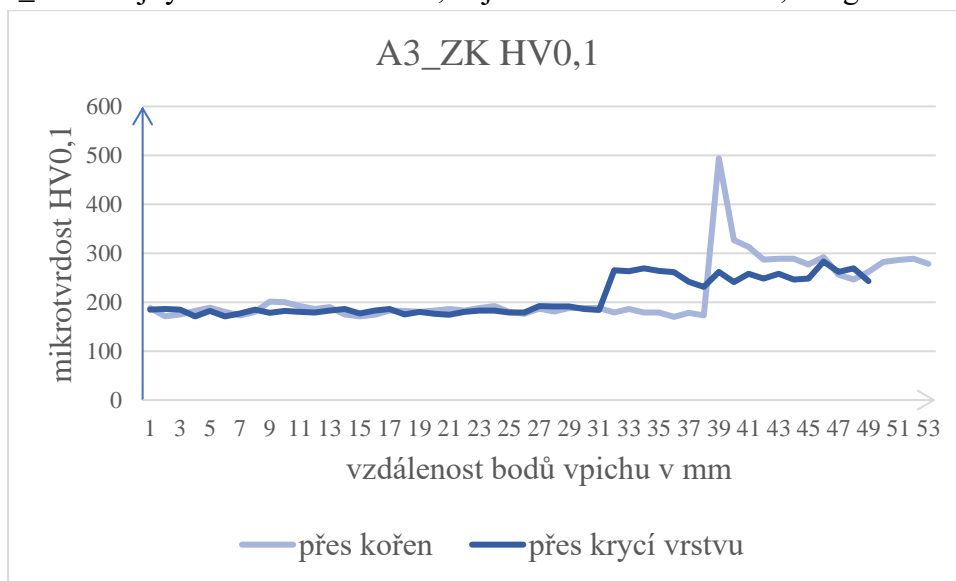
Graf 2: R2 průběhy mikrotvrdostí

- A2 – nejvyšší tvrdost 282 HV<sub>0,1</sub> zjištěna v oblasti kořene, viz graf 3



Graf 3: A2 průběhy mikrotvrdostí

- A3\_ZK – nejvyšší tvrdost 494 HV<sub>0,1</sub> zjištěna v oblasti kořene, viz graf 4

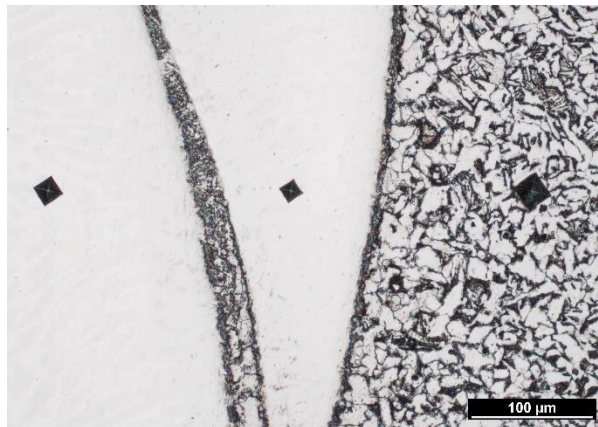


Graf 4: A3 průběhy mikrotvrdostí

U vzorku A3\_ZK mikrotvrdost v oblasti kořene dosáhla 494 HV<sub>0,1</sub>, u R2 420 HV<sub>0,1</sub>. Oba extrémy vychází do míst výskytu základních struktur na rozhraní FP a svarového kovu, viz obr. 75 u A3\_ZK a obr. 76 u R2.



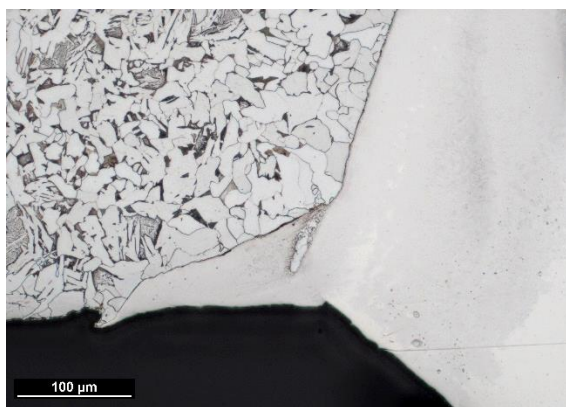
Obr. 75: A3\_ZK vpich na rozhraní FP-SK



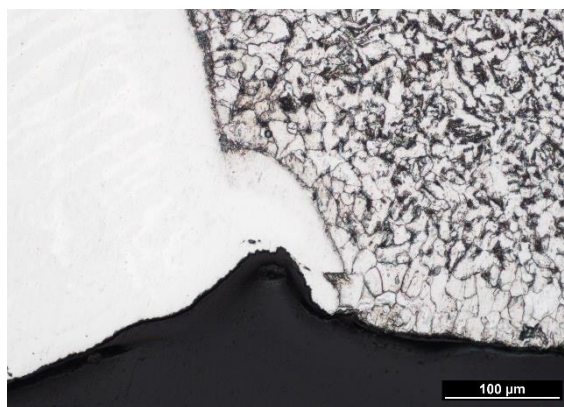
Obr. 76: R2 vpich na rozhraní FP-SK

### 3.6 Zvýšení korozní odolnosti [63], [64], [65]

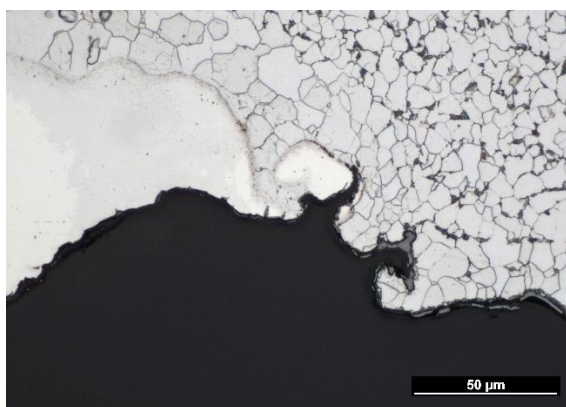
Již při prvotním zkoumání povrchu vzorků pod optickým mikroskopem se na povrchu nelegovaných materiálů objevovaly korozní produkty. Metalografické rozbory ukázaly na vzorcích doposud nezatížených provozem defekty (korozní důlky) na rozhraní FP základního materiálu a SK a drobné vruby ve SK; mohou se stát iniciačním místem šíření trhliny. Místa byla pokryta oxidy. Vady o velikostech 18–75  $\mu\text{m}$  na obr. 77–80.



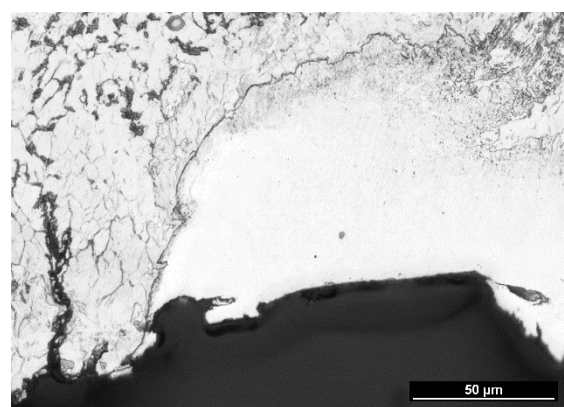
Obr. 77: R1\_b defekt v ZM; nital



Obr. 78: R2 defekt ve SK; nital



Obr. 79: A2 defekt v ZM; nital

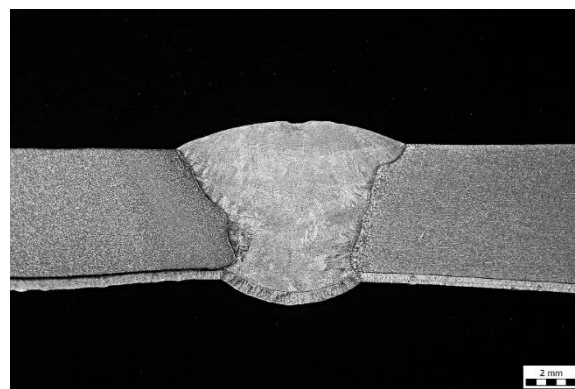


Obr. 80: A3\_ZK defekt v ZM i SK; nital

Příčinou vzniku defektu v HSS na potrubí superhavarijního napájení bylo šíření korozní trhliny. Trhliny se šířily mechanismem korozního praskání (koroze pod napětím) v důsledku vzájemného působení použitých materiálů, stavu napjatosti a provozního média. Jedním z opatření pro zajištění bezpečného provozu se stalo provedení galvanického niklování kořene.

Po svaření spoje se provede opracování oblasti kořene a jeho přilehlé oblasti. Následují NDT, galvanické pokovení (makrosnímek na obr. 81) a znovu NDT.

Projde-li dílenský mezikus všemi zmíněnými stupni realizace a kontrol, může být nasazen do provozu.



Obr. 81: Makro svaru s Ni mezivrstvou [65]

#### 4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ [19], [21], [35], [44], [60], [67], [68]

Druh použitých materiálů, příprava svarových ploch i ochranný plyn byly u obou způsobů svařování shodné. Rozdílná byla příprava pro svařování. Zatímco u ručního mohl svářeč pracovat prakticky okamžitě, automatizovaný způsob vyžadoval „naladění parametrů“. Automat je velice náročný na přípravu ploch, pravidelnost geometrie, použitý materiál a jeho chování, resp. správnost nastavení vstupních hodnot, je třeba nejdříve ověřit na zkušebním vzorku.

Vzorky R1\_b a R2 svařované ručně byly vyhotoveny ve třech vrstvách. A3\_ZK (zkušební) provedený automatem také na tři svarové housenky, ale vzorky A1 a A2 připravované pro experiment na čtyři. Zde se projevila senzitivita stroje. A3\_ZK a A1 s A2 jsou z jiných materiálů, i když schválených ekvivalentů. Během svařování A1 i A2 operátor zaznamenal nedostatečné natavení hran a rozhodl o provedení dodatečné krycí vrstvy. Tyto komplikace si u ručního způsobu zručný svářeč koriguje sám již při zhotovení jednotlivých svarových housenek.

V oblasti kořene se projevila i rozdílná poloha svařování. Při poloze PA bylo převýšení kořene neměnné. V poloze PK (plně automatizované orbitální svařování) s přispěním gravitace byl kořen v horní části trubky mírně převýšený (ale stále vyhovující normě), ve spodní lícovál se základním materiálem, nicméně došlo k lehkému stahování kořenové vrstvy. Eliminovat jev by se dalo pomocí polohovadla, svařováním v poloze PA s otáčením dílu.

Největší diferenci u obou způsobů představuje tepelný příkon. Množství vneseného tepla do základních materiálů ovlivňuje vlastnosti tepelně ovlivněné oblasti. Při vyšší hodnotě přehřátí u ručního svařování probíhají difúzní pochody většího rozsahu a v TOO vznikne Widmannstaettenova struktura s charakteristickými jehlicemi feritu prorůstajícími do perlitu (lze omezit zvýšením rychlosti svařování, snížením velikosti proudu či použitím pulsního způsobu svařování). Při nižším tepelném příkonu a tím rychlejším ochlazení (případ mechanizovaného svařování) může vzniknout martenzitická struktura, která způsobuje křehkost materiálu a může dojít k jeho praskání. U obou ručních vzorků se Widmannstaettenova struktura objevila přes celou přehřátou oblast, u vzorků A2, A3\_ZK pouze v okolí krycí vrstvy SK. Základní struktury se vyskytují u všech vzorků lokálně podél linie ztavení na rozhraní FP materiálu a SK. Skutečnost je doložena nejen z pozorování struktur světelným mikroskopem, ale i provedenými zkouškami mikrotvrdosti. Základní struktury postrádají oblast plastické deformace; chovají se křehce. Viditelné jsou i pásma oduhličení, charakteristické snížením pevnosti, nauhličení, pásma podtavení se silným promíšením. V linii ztavení se vyskytuje méně chromu a niklu (snížení korozní odolnosti). Zvýšit korozní odolnost lze použitím přídatného materiálu s vysokým podílem niklu (přelegování).

Hodnoty mikrotvrdosti vychází v oblastech základních struktur dost vysoké. Pokud se držíme předpokladu, že maximální doporučené tvrdosti v TOO činí až 380 HV, překročíme tuto hodnotu u A3\_ZK o 30 %, u R2 o 11 % (obě hodnoty naměřené v základních strukturách v kořenové oblasti). I když srovnávat hodnoty tvrdosti a mikrotvrdosti úplně nelze, protože mikrotvrdost vychází vždy vyšší i při stejném tvaru vnikacího tělesa. Pro zatěžovací sílu menší než 10 N přestává platit Kickův zákon závislosti na materiálových vlastnostech; od síly 2 N platí Meyerův zákon a mikrotvrdost se stává funkcí velikosti vtisku. Je to způsobeno zmenšením vtisku po odlehčení o pružnou deformaci, jejíž podíl na celkové velikosti vtisku se zvyšuje a není již zanedbatelný.

Svarový kov vykazoval především u A2 a A3\_ZK ve velká zrna v oblasti kořene. Jejich vzhled připomínal zrna feritická.

Domněnku podporuje zpráva [68]. Ve zprávě bylo ověřeno chemické složení SK v oblasti kořene u vzorků svařených ze stejných ZM a PM mechanizovaným způsobem. Dosazení zjištěných údajů složení SK do Shaefflerova diagramu potvrzuje strukturu spadající do oblasti A+M+F. Rozborem byla zjištěna i nižší koncentrace Cr a Ni než v krycí vrstvě SK, obsah  $\delta$  feritu pod 2 % (náchylnost ke vzniku horkých trhlin).

Hranice zrn všech vzorků použitých pro experiment pokrývaly karbidy. Karbidické síťoví značně snižuje houževnatost materiálu a jeho korozní odolnost (náchylnost k mezikrystalové korozi). V kořeni dochází k silnému promíšení základního a přídavného materiálu. Zvolený přídavný materiál neobsahuje titan či niob; tyto prvky mají větší afinitu k uhlíku než chrom a omezují tvorbu  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ . Snížení tvorby karbidů  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  zajistí přídavný materiál s obsahem niobu (při dodržení doporučení  $\text{Nb/C} \geq 8$ : obsah niobu alespoň 0,432 hm %). Používané základní austenitické materiály sice obsahují požadované množství titanu pro stabilizaci, ale titan se pravděpodobně navázal na síru, fosfor nebo částečně vyhořel během svařování. Účinky fosforu (odolnost proti praskání za tepla) měla omezit přítomnost  $\delta$  feritu. Aby mohl  $\delta$  ferit transformovat, doporučuje se pro austenitické oceli tepelný příkon max.  $1,5 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$ . Doporučená hodnota u ručního způsobu svařování dodržena nebyla (projevilo se u R2 výskytem krystalizačních trhlinek). U automatizovaného způsobu byly hodnoty Q mnohem nižší, nicméně i u A2 vznikla kráterová staženina. Při velmi nízkém Q v kombinaci s nedokonalou přípravou svarových ploch navíc hrozí výskyt studených spojů.  $\delta$  ferit se v této části SK vizuálně nevyskytoval ani u jednoho ze vzorků.

Výplňové a krycí vrstvy u ručních vzorků krystalizovaly ve formě dendritů. Mezidendritické prostory vyplňoval  $\delta$  ferit. Automatem zhotovené svary měly dendritickou s převažující celulární strukturou. V krycí vrstvě se objevoval  $\delta$  ferit. Celulární struktura je typická pro svary zhotovené pulsním proudem kvůli menšímu teplotnímu gradientu; nemá přednostní krystalografickou orientaci. Výsledkem buněčného, ale zejména dendritického složení, je vznik nehomogenit chemického složení – tzv. dendritická mikrosegregace, která vede ke zhoršení mechanických vlastností. Nicméně obsažený  $\delta$  ferit umí tyto nedostatky částečně kompenzovat. Záleží také na chemickém složení materiálu a automat díky rozkvyvu provede větší zředění (promíšení) přídavného a základního materiálu.

Podrobné ekonomické hodnocení nebylo provedeno. Nelze vyčíslit pouze náklady na materiály, úpravy svarových ploch, potřebnou dokumentaci, nedestruktivní zkoušení, náklady na vybavení a svářeče, resp. operátora a svařovací čas. Rozhodujícím faktorem je v tomto případě kvalita, která je hlavní z pohledu dlouhodobé spolehlivosti provozovaného zařízení. Nekvalitní provedení svarového spoje může způsobit neplánované odstavení bloku a výrazný finanční dopad.

Ceny vybavení jednotlivých pracovišť jsou nesrovnatelné. Zatímco zdroj i s hořákem pro ruční svařování (je vybaven i možností pulsace) se pohybuje v jednotkách tisíc, vybavit automatizované pracoviště stojí statisíce.

Hodinová sazba dobrého svářeče s praxí a potřebnými certifikáty je vyšší přibližně o 15 % oproti sazbě operátora.

Porovnání svařovacích časů – čistý čas pro svařování dílenského mezikusu ručně je přibližně 30 minut, automatizovaně tři vrstvy 19 minut; v případě čtyř 25 minut. Časová prodleva pro dodržení teploty interpass bude u ručního provedení o něco vyšší.

## 5 ZÁVĚRY [69]

Práce se zaměřila na srovnávání ručního a automatizovaného způsobu svařování při výrobě heterogenního dílenského mezikusu potrubí superhavarijního napájení parogenerátoru.

Pět zkušebních vzorků bylo vyhotoveno ze stejných (či ekvivalentních) základních i přídavných materiálů, se shodnou přípravou svarových ploch; dva ručně (R1\_b, R2), tři automatem (A1, A2, A3\_ZK). Základní feriticko-perlitický materiál (12 022.1, P265GH) s orientací perlitu ve směru válcování, austenitický (08Ch18N10T, 1.4541) s dvojčatěním hranic zrn a výskytem TiC(N). Přídavný vysokolegovaný materiál Sv-07Ch15N13.

Po provedení byly díly zkontrolovány nedestruktivními technikami – VT, PT, RT, UT– PA. Nebyly zjištěny vady způsobené procesem svařování. U dvou byly vyhodnoceny rýhy (otlaky) v TOO a vzorky by se staly pro provoz nevyhovujícími. Na tyto nedostatky má přijít kontrola materiálu před svařováním. Po NDT byl vyloučen z dalších rozborů vzorek A1.

Následovaly destruktivní kontroly. Na čtyřech vzorcích byla provedena PT vnitřního povrchu. U vzorku A2 indikován studený spoj (nevyhovující vada).

Metalografické rozborů ukázaly rozdílnost ve strukturách způsobených množstvím vneseného tepla. Průměrná velikost TOO základního feriticko-perlitického materiálu u ručních vzorků 5,5–6 mm, v provedení automatem 3,5–5 mm; austenitického ZM u ručních vzorků 1,1– 1,4 mm, svařených automatem 0,8–1,7 mm. Celou přehřátou oblast R1\_b i R2 vyplňovala Widmannstaettenova struktura, A2, A3\_ZK síťoví až Widmannstaettenova struktura v oblasti krycí vrstvy. U všech vzorků se objevovala pásma oduhličení a nauhličení, zákalné struktury, pásma podtavení. Měření mikrotvrdosti potvrdilo velký nárůst hodnot v zákalných strukturách; vyšší hodnota u mechanizovaného způsobu svařování na srovnatelném místě v porovnání s ručním vzorkem.

Viditelné byly rozdíly ve strukturách během tuhnutí svarového kovu. Výplň i krycí vrstva u ručních vzorků krystalizovaly dendriticky ve směru odvodu tepla. Dendrity zřetelně vyplněny  $\delta$  feritem. Stejně vrstvy u automatu krystalizovaly dendriticky až celulárně.  $\delta$  ferit viditelný v oblasti krycí vrstvy.

V kořenové části u linie ztavení se vyskytovaly korozní důlky a vruby; potenciální místa pro iniciaci trhlin. Aplikace galvanického niklování (např. dle [69]) představuje dobrou možnost ochrany. Zpráva uvádí i doporučení věnovat zvýšenou pozornost přípravě povrchu před samotným provedením mezivrstvy tak, aby se na něm vyskytovalo co nejméně kovových a nekovových vměstků.



## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [70]

1. Zákon č. 263/2016 Sb., atomový zákon.
2. ČEZ a.s., učební texty pro přípravu personálu JE: *Základní schéma jaderné elektrárny Dukovany*. 2016.
3. ČEZ a.s., učební texty pro přípravu personálu JE: *PRIMÁRNÍ ČÁST JE VVER 440. Základní zařízení primárního okruhu, textová část*. 2007, 174 s.
4. ČEZ a.s., učební texty pro přípravu personálu JE: *PRIMÁRNÍ ČÁST JE VVER 440. Základní zařízení primárního okruhu, obrázková část*. 2006, 279 s.
5. TPE 10-40/1771/2014-JE. *Všeobecné technické podmínky pro montážní svařování potrubí elektráren typu VVER*. 2014, 39 s.
6. **NORMATIVNĚ TECHNICKÁ DOKUMENTACE ASOCIACE STROJNÍCH INŽENÝRŮ. Sekce II.: Charakteristiky materiálů pro zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER**. Praha, 2017. 120 s.
7. GOST 5520-79 [online]. [cit. 2019-04-18].  
Dostupné z: [http://metallischekiy-portal.ru/downloadgost/5520-79\\_f1.pdf](http://metallischekiy-portal.ru/downloadgost/5520-79_f1.pdf)
8. ČSN EN 10028-2. *Ploché výrobky z ocelí pro tlakové účely – Část 2: Nelegované a legované oceli se stanovenými vlastnostmi pro vyšší teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018. 36 s.
9. ČSN 41 2022. *Ocel 12 022*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1985. 8 s.
10. GOST 5632-72 [online]. [cit. 2019-04-08].  
Dostupné z: [https://ussa.su/gosts/GOST\\_5632\\_Himsostav.PDF](https://ussa.su/gosts/GOST_5632_Himsostav.PDF)
11. ČSN EN 10088-3. *Korozivzdorné oceli – Část 3: Technické dodací podmínky pro polotovary, tyče, válcované dráty, profily a lesklé výrobky z ocelí odolných korozi pro obecné použití*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015. 68 s.
12. ČSN EN 10088-1. *Korozivzdorné oceli – Část 3: Přehled korozivzdorných ocelí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015. 88 s.
13. GOST 2246-70 [online]. [cit. 2019-04-08].  
Dostupné z: [https://ussa.su/gosts/GOST\\_2246\\_Provoloka\\_svarochnaya.PDF](https://ussa.su/gosts/GOST_2246_Provoloka_svarochnaya.PDF)
14. ČEZ, a. s. *Inspekční certifikáty základních materiálů*. 12 s.
15. ČSN EN 10273. *Tyče válcované za tepla ze svařitelných ocelí se zaručenými vlastnostmi při vyšších teplotách pro tlakové účely*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017. 36 s.
16. PNAE G-7-010-89. *Equipment and Piping of Nuclear Power Installations. Weld Joints and Weld Overlays. Rules of inspection*. Moskva, 2000. 91 s.
17. **NORMATIVNĚ TECHNICKÁ DOKUMENTACE ASOCIACE STROJNÍCH INŽENÝRŮ. Sekce I.: Svařování zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER**. Praha, 2018. 152 s.
18. ČEZ, a. s. *Inspekční certifikáty přídatných materiálů*. 12 s.
19. Kolektiv autorů. *Materiály a jejich svařitelnost*. 1. vydání. Ostrava: ZEROSS – svářečské nakladatelství, 2001. 292 s. ISBN 80-85771-85-3



20. HRIVŇÁK, Ivan. *Teória zvariteľnosti kovov a zliatin*. Bratislava: Veda, 1989.
21. KUBÍČEK, Jaroslav. *Trhliny za horka – AUSTENITICKÉ OCELI*. Studijní materiál. Brno, 2015. 6 s.
22. PILOUS, Václav a Karel STRÁNSKÝ. *Strukturní stálost návarů a svarových spojů v energetickém strojírenství*. Praha: Academia, 1989. Studie ČSAV.
23. ČSN EN ISO 15614-1. *Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů – Zkouška postupu svařování – Část 1: Obloukové a plamenové svařování oceli a obloukové svařování niklu a slitin niklu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018. 48 s.
24. ČSN EN ISO 4063. *Svařování a příbuzné procesy – Přehled metod a jejich číslování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. 24 s.
25. Kolektiv autorů. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-85771-81-0.
26. Kolektiv autorů. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava, 2016.
27. MINAŘÍK, Václav. *Obloukové svařování*. Praha: Scientia, 1998. ISBN 80-7183-119-0.
28. MINAŘÍK, Václav. *Přehled metod svařování*. 3., aktualiz. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2011. Svařování. ISBN 978-80-86698-18-2.
29. SCHWARZ, Drahomír. *Nekonvenční metody svařování: studijní materiály. Část I, Svařování kovů*. Ostrava: Český svářečský ústav Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3093-3.
30. Trendy vývoje svařování plazmou [online]. [cit. 2019-02-07]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/trendy-vyvoje-svarovani-plazmou>
31. Laserové a plazmové svařování. [online]. [cit. 2019-02-07]. Dostupné z: <http://fs1.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/16-17-83-84.pdf>
32. Technologie využívající laser. [online]. [cit. 2019-02-07]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_svarovani\\_laserem\\_2013\\_mrna.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_svarovani_laserem_2013_mrna.pdf)
33. ČSN EN ISO 6947. *Svařování a příbuzné procesy – Polohy svařování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. 24 s.
34. ČEZ, a. s. *PPO – výměna HTG svaru na trase SHN PG3*. Projektové číslo: ZE0707010/ZKA/00103. 2018, 21 s.
35. Svařování. [online]. [cit. 2019-02-07]. Dostupné z: [http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovai/UT\\_01\\_Prehled\\_svarovani\\_T08.pdf](http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovai/UT_01_Prehled_svarovani_T08.pdf)
36. OLSON D.L. a kolektiv autorů. *ASM Handbook. Welding, brazing, and soldering Volume 6.*: vyd. Materials Park, Ohio, 2011. ISBN-13978-1-61503-133-7.
37. BARTÁK, Jiří, Václav PILOUS a Rudolf KOVAŘÍK. *Učební texty pro evropské svářečské specialisty, praktiky a inspektory*. Ostrava: ZEROSS, 2002. Svařování. ISBN 80-85771-97-7.
38. ČEZ, a. s. *pWPS č. A-88x6,3-A+U-PK*. 2019, 5 s.

39. Výběr ochranných plynů pro obloukové svařování. [online]. [cit. 2019-02-07]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/vyber-ochrannych-plynu-pro-obloukove-svarovani/>
40. Kovové materiály a jejich zpracování. [online]. [cit. 2019-02-07]. Dostupné z: [http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/4\\_1\\_kovove-materialy-a-jejich-zpracovani.pdf](http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/4_1_kovove-materialy-a-jejich-zpracovani.pdf)
41. ORSZÁGH, Viktor a Peter ORSZÁGH. *Zváranie TIG ocelí a neželezných kovov*. Bratislava: Polygrafia SAV, 1998. ISBN 80-88780-21-7.
42. Kolektiv autorů. *Materiály a jejich chování při svařování*. Učební texty pro mezinárodní/evropské svářečské inženýry a technology (I/EWE, I/EWT). Ostrava, 2016. 404 s.
43. ČSN EN 1011-1. *Svařování – Doporučení pro svařování kovových materiálů – Část 1: Všeobecná směrnice pro obloukové svařování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009. 16 s.
44. Doplnující údaje a tabulky firmy ESAB. [online]. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: [http://www.svarovani.cz/userfiles/files/07-11-original\\_smallpdf.com\\_.pdf](http://www.svarovani.cz/userfiles/files/07-11-original_smallpdf.com_.pdf)
45. Povrchové úpravy materiálů, jejich účel a provádění. [online]. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/povrchove-upravy-materialu-jejich-ucel-a-provadeni/>
46. Povrchové úpravy kovů. [online]. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/povrchove-upravy-kovu.html>
47. Koroze a ochrana před korozí. [online]. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <http://jhamernik.sweb.cz/Koroze.htm>
48. TNI CEN ISO/TR 15608. *Svařování – Směrnice pro zařazování kovových materiálů do skupin*. Praha: Český normalizační institut, 2008. 12 s.
49. PNAE G-7-003-87. *Certification rules for welders of nuclear power plants equipment and pipelines*. Moskva, 1988. 15 s.
50. OP 1513-72 Základní předpisy pro svařování a navařování uzlů konstrukcí jaderných elektráren, experimentálních a výzkumných jaderných reaktorů a souborů Praha: Ústř. inf. středisko pro jaderný program, 1976. 166 s.
51. PK 1514-72. Pravidla kontroly svarových spojů a návarů uzlů a konstrukcí jaderných elektráren, zkušebních a výzkumných jaderných reaktorů a zařízení (překlad z ruského jazyka). Moskva: Metallurgia, 1974.
52. ČSN EN ISO 17637. *Nedestruktivní zkoušení svarů – Vizuální kontrola tavných svarů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018. 16 s.
53. ČSN EN ISO 3452-1. *Nedestruktivní zkoušení – Kapilární zkouška. Část 1, Obecné zásady*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015. 24 s.
54. ČSN EN ISO 17636-1. *Nedestruktivní zkoušení svarů – Radiografické zkoušení. Část 1, Metody rentgenového a gama záření využívající film*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013. 36 s.

55. ČSN EN ISO 19232-1. *Nedestruktivní zkoušení svarů – Kvalita obrazu radiogramů. Část 1, Stanovení hodnot kvality obrazu drátkovými měrkami*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014. 12 s.
56. ČSN EN 5817. *Svařování – Svarové spoje oceli, niklu, titanu a jejich slitin zhotovené tavným svařováním (kromě elektronového a laserového svařování) – Určování stupňů kvality*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014. 36 s.
57. ČSN EN ISO 16810. *Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení ultrazvukem – Obecné zásady*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014. 16 s.
58. Typy vad, příčiny jejich vzniku a hodnocení. [online]. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384>
59. MOLLIKOVA, Eva. *Zkoušení materiálů a výrobků*. Interaktivní výukový materiál. VUT Brno, Fakulta strojního inženýrství, 2005.
60. PLUHAŘ, Jaroslav. *Nauka o materiálech*. Praha: SNTL, 1989, 549 s.
61. KOŠELEV, Vladimír. *Metalografické tabulky*. Praha: Technicko-vědecké vydavatelství, 1952. 71 s. + 61 obr. příloh.
62. ČSN EN ISO 6507-1. *Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Vickerse – Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015. 32 s.
63. KUBOŇ, Z. a kolektiv. *Stanovení příčin poškození heterogenního svarového spoje na předaném vzorku*. Ostrava, 2015. 20 s. Číslo zprávy T-47/2015.
64. HAUŠILD, Petr, Jan SIEGL a kolektiv. *Analýza příčin porušení HSS na výřezu potrubí superhavarijního napájení PG 23 EDU*. Praha: FJFI, 2018. 50 s. Číslo zprávy V- KMAT-1034/18.
65. HAJDÍK, Jiří.: *Kontroly a opravy PG, aplikace WOL na EDU; Zkušenosti s provozováním, údržbou, kontrolou a opravami PG VVER; 10. – 11. září 2018* [prezentace]. 2018 [cit. 2019-05-10].
66. KUCHAR, L. a J. DRÁPALA. *Segregační jevy při krystalizaci a jejich vliv na strukturní charakteristiky krystalů*. [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: [https://csacg.fzu.cz/func/viewpdf.php?file=2002\\_12Kuchar.pdf](https://csacg.fzu.cz/func/viewpdf.php?file=2002_12Kuchar.pdf)
67. DUŠEK, Jiří. *Tvrdomost, mikrotvrdomost, nanotvrdomost – čisté kovy měřené metodou DSI*. Brno, 2008. Disertační práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta. [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: [https://is.muni.cz/th/tjgzq/phd\\_thesis\\_dusek.pdf](https://is.muni.cz/th/tjgzq/phd_thesis_dusek.pdf)
68. TONAROVÁ Dana, Miroslava ERNESTOVÁ a Libor TOMEK. *Hodnocení heterogenního svarového spoje s niklovou vrstvou na vnitřním povrchu (orbitální HSS S490/18/06)*. ÚJV Řež, a.s., 2019. 61 s.
69. KANDER, Ladislav a kolektiv. *Hodnocení účinnosti korozní ochrany vzorků HSS galvanickým niklováním*. Ostrava, 2015. 20 s. Číslo zprávy T-49/2015.
70. ČSN ISO 690. *Informace a dokumentace – Pravidla pro bibliografické odkazy a citace informačních zdrojů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. 40 s.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A <sub>5</sub>	Tažnost	[%]
Ac <sub>1</sub>	Teplota eutektoidní přeměny	[°C]
Ac <sub>3</sub>	Teplota transformace austenitu na ferit	[°C]
CE	Ekvivalent uhlíku	[-]
Cr <sub>E</sub>	Ekvivalent chromu	[-]
FN	Feritové číslo	[-]
I	Intenzita svařovacího proudu	[A]
I <sub>p</sub>	Impulsní proud	[A]
I <sub>z</sub>	Základní proud	[A]
K	Koeficient tepelné účinnosti metody svařování	[-]
KCV	Vrubová houževnatost	[J·cm <sup>-2</sup> ]
Ni <sub>E</sub>	Ekvivalent niklu	[-]
Q	Tepelný příkon	[kJ·mm <sup>-1</sup> ]
r	Rozkvyv	[mm]
R <sub>m</sub>	Pevnost v tahu	[MPa]
R <sub>p0,2</sub>	Smluvní mez kluzu při plastické deformaci 0,2 %	[MPa]
T	Teplota	[°C]
t <sub>c</sub>	Celkový čas svařovacího cyklu	[s]
T <sub>L</sub>	Teplota likvidu	[°C]
t <sub>KO</sub>	Kritická teplota křehkosti	[°C]
T <sub>max</sub>	Maximální teplota svařovacího cyklu	[°C]
t <sub>p</sub>	Čas pulsního proudu	[s]
T <sub>př</sub>	Teplota přehřátí	[°C]
T <sub>S</sub>	Teplota solidu	[°C]
t <sub>z</sub>	Čas základního proudu	[s]
U	Napětí při svařování	[V]
v	Rychlost svařování	[mm·s <sup>-1</sup> ]
vOSH	Rychlost otáčení svařovací hlavy	[mm·min <sup>-1</sup> ]
vPPM	Rychlost podávání přídatného materiálu	[mm·min <sup>-1</sup> ]
Z	Kontrakce	[%]
α <sub>t</sub>	Součinitel délkové teplotní roztažnosti	[K <sup>-1</sup> ]
A	Austenit	
ARA	Anizotermický rozpad austenitu	
b	Broušený (vzorek)	
BP	Bakalářská práce	
BT	Bezpečnostní třída	
BW	Butt Weld (tupý svar)	
C	Uhlík	
	The European Committee for Standardization (Evropský výbor pro normalizaci)	
CEN		
ČSN	Česká státní norma	
EN	European Norm (evropská norma)	
F	Ferit	
FP	Feriticko-perlitický	
	Сертификат соответствия ГОСТ (Osvědčení o shodě; národní ruský standard)	
GOST		

HSS	Heterogenní svarový spoj
IIW	International Institute of Welding (mezinárodní svářečský institut)
ISO	International Standard Organisation (mezinárodní organizace pro normalizaci)
JE	Jaderná elektrárna
M	Martenzit
MIG	Metal Inert Gas Welding (Obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu)
MKK	Mezikrystalová koroze
N	Složení dle normy
NDT	Non Destructive Testing
NTD A.S.I.	Normativně technická dokumentace Asociace strojních inženýrů
OP	Oborový předpis
PAW	Plasma Arc Welding (svařování plasmou)
PG	Parogenerátor
PK	Pravidla kontroly
PM	Přídavný materiál
PNAE G	Federální normy a pravidla v oblasti využití atomové energie
PT	Penetration Testing (kapilární zkouška)
pWPS	Preliminary Welding Procedure Specification (předběžná specifikace postupu svařování)
RMSS	Riziková místa se svarovými spoji
RT	Radiography Testing (prozařovací zkouška)
SHN	Superhavarijní napájení
SK	Svarový kov
TIG / WIG	Tungsten Inert Gas Welding / Wolfram Inert Gas (Obloukové svařování netavící se elektrodou v inertním plynu)
TNI	Technical Standards Interpretations
TOO	Tepelně ovlivněná oblast
TPE	Technické podmínky
TR	Technical Report (technická zpráva)
UT-PA	Ultrasonic Testing – Phased Array (ultrazvuková zkouška)
V <sub>(1,2,3)</sub>	Vrstva
VT	Visual Testing (vizuální kontrola)
VVER	Vodo-vodní energetický reaktor
WC	Wolfram Cadmium (elektroda)
WL	Wolfram Lanthan (elektroda)
WOL	Weld Overlay
WPQR	Welding Procedure Qualification Record (záznam o kvalifikaci postupu svařování)
WPS	Welding Procedure Specification (specifikace postupu svařování)
XRF	X-ray fluorescence
YLS	Ytterbium fiber Laser (vláknový laser)
ZK	Zkušební (vzorek)
ZM	Základní materiál
α	Ferit
γ	Austenit

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Základní schéma JE Dukovany [2].....	10
Obr. 2: Parogenerátor V-213 [4].....	11
Obr. 3: Potrubí SHN, napojení na PG.....	12
Obr. 4: Potrubí SHN, část příčného řezu PG [4] .....	12
Obr. 5: Schaefflerův diagram [19].....	16
Obr. 6: De Longův diagram [19] .....	17
Obr. 7: Suutalův diagram [21] .....	17
Obr. 8: Závislost tvrdosti na obsahu C [19].....	18
Obr. 9: Procesní hlava robotu .....	21
Obr. 10: Příprava svarových ploch [34].....	22
Obr. 11: Postup svařování [34] .....	22
Obr. 12: Přímé a nepřímé zapojení [35] .....	23
Obr. 13: Svařování střídavým proudem [35] .....	23
Obr. 14: Průběh impulsního proudu [26].....	24
Obr. 15: Detail sítka.....	24
Obr. 16: Geometrie broušení elektrody [38].....	25
Obr. 17: Broušení elektrody.....	25
Obr. 18: PM pro ruční svařování .....	27
Obr. 19: PM pro automat .....	27
Obr. 20: Průběh ručního svařování TIG .....	27
Obr. 21: Automatizované pracoviště .....	28
Obr. 22: Svařovací deska MU IV .....	29
Obr. 23: Detail hořáku .....	29
Obr. 24: Vliv teplotního cyklu svařování na strukturu svarového spoje [42].....	30
Obr. 25: Diagram ARA pro podeutektoidní legované oceli [40] .....	31
Obr. 26: Tvar svarového spoje .....	33
Obr. 27: Úprava svarových ploch .....	33
Obr. 28: Detail úkosu.....	33
Obr. 29: R1_b kořenová vrstva.....	34
Obr. 30: R1_b broušená výplň.....	34
Obr. 31: R1_b krycí vrstva .....	34
Obr. 32: A2 kořenová vrstva.....	36
Obr. 33: A2 výplň .....	36
Obr. 34: A2 krycí vrstva .....	36
Obr. 35: PT – penetrant.....	37
Obr. 36: PT – vývojka.....	37
Obr. 37: A2 – vyříznutý prstenec.....	37
Obr. 38: A2 – indikace studeného spoje .....	37
Obr. 39: Připravovaný vzorek.....	38
Obr. 40: Pracoviště se zářičem .....	38
Obr. 41: RT indikace vtlačeného kořene .....	39
Obr. 42: UT-PA na FP materiálu .....	39
Obr. 43: UT-PA na A materiálu.....	39
Obr. 44: UT-PA indikace „zábrusu“ u A3_ZK ze strany austenitu.....	40
Obr. 45: Pracoviště se stereomikroskopem.....	41
Obr. 46: R1_b kořen pod stereomikroskopem.....	41
Obr. 47: R2 kořen pod stereomikroskopem.....	42
Obr. 48: R2 krystalizační trhliny .....	42

Obr. 49: A2 kořen pod stereomikroskopem.....	42
Obr. 50: A2 detail oxidického povlaku.....	43
Obr. 51: A3_ZK kořen pod stereomikroskopem .....	43
Obr. 52: A3_ZK rozstřík.....	43
Obr. 53: A3_ZK rýha v TOO.....	43
Obr. 54: Pracoviště s optickým mikroskopem.....	44
Obr. 55: R1_b TOO; nital .....	44
Obr. 56: A3_ZK TOO; nital .....	44
Obr. 57: R2 Widmann. struktura; nital .....	45
Obr. 58: R2 PO v oblasti kořene; nital.....	45
Obr. 59: A2 PO v krycí vrstvě; nital .....	45
Obr. 60: A3_ZK PO v krycí vrstvě; nital.....	45
Obr. 61: R1_b makro svaru; šťavel.....	45
Obr. 62: A3_ZK makro svaru; šťavel .....	45
Obr. 63: R1_b kořen SK; šťavel .....	46
Obr. 64: A2 kořen SK; šťavel .....	46
Obr. 65: R1_b výplň SK; šťavel .....	46
Obr. 66: A2 výplň SK; šťavel .....	46
Obr. 67: R1_b krycí vrstva SK; šťavel .....	46
Obr. 68: A2 krycí vrstva SK; šťavel .....	46
Obr. 69: R1_b promíšení; šťavel .....	47
Obr. 70: A3_ZK promíšení; šťavel .....	47
Obr. 71: R1_b základné struktury; šťavel .....	47
Obr. 72: R1_b pásmo karbidů; šťavel.....	47
Obr. 73: Mikrotvrdoměr DuraScan 70.....	48
Obr. 74: Vpichy v úrovni kořene .....	48
Obr. 75: A3_ZK vpich na rozhraní FP–SK .....	50
Obr. 76: R2 vpich na rozhraní FP–SK.....	50
Obr. 77: R1_b defekt v ZM; nital .....	51
Obr. 78: R2 defekt ve SK; nital .....	51
Obr. 79: A2 defekt v ZM; nital .....	51
Obr. 80: A3_ZK defekt v ZM i SK; nital .....	51
Obr. 81: Makro svaru s Ni vrstvou [65].....	50



## SEZNAM TABULEK A GRAFŮ

Tab. 1: Chemické složení austenitických ocelí v hm. % [6], [10], [11], [14].....	13
Tab. 2: Mechanické a fyzikální vlastnosti 08Ch18N10T [6], [14].....	13
Tab. 3: Mechanické vlastnosti 1.4541 [11], [14].....	13
Tab. 4: Chemické složení feriticko-perlitických ocelí v hm. % [6], [8], [9], [14], [15] .....	14
Tab. 5: Mechanické a fyzikální vlastnosti 12 022 [6], [11], [14] .....	14
Tab. 6: Mechanické vlastnosti P265GH [8].....	14
Tab. 7: Chemické složení Sv-07Ch25N13 v hm. % [13], [16], [17], [18] .....	15
Tab. 8: Mechanické vlastnosti svarového kovu Sv-07Ch25N13 [13].....	15
Tab. 9: Zkušební vzorky .....	32
Tab. 10: Parametry ručního svařování vzorků R1_b, R2 .....	33
Tab. 11: Parametry automatizovaného svařování vzorku A3_ZK – V1 kořen .....	35
Tab. 12: Parametry automatizovaného svařování vzorku A3_ZK – V2 výplň. ....	35
Tab. 13: Parametry automatizovaného svařování vzorku A3_ZK – V3 krycí vrstva.....	35
Tab. 14: Výsledky RT.....	38
Graf 1: R1_b průběhy mikrotvrdostí .....	48
Graf 2: R2 průběhy mikrotvrdostí .....	49
Graf 3: A2 průběhy mikrotvrdostí .....	49
Graf 4: A3_ZK průběhy mikrotvrdostí .....	50

## SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Inspekční certifikáty základních materiálů
- Příloha 2 Inspekční certifikáty přídavných materiálů
- Příloha 3 Ověření chemického složení základních materiálů (XRF spektrometr)
- Příloha 4 Parametry svařování vzorků A1 a A2
- Příloha 5 R1\_b metalografie
- Příloha 6 R2 metalografie
- Příloha 7 A2 metalografie
- Příloha 8 A3\_ZK metalografie
- Příloha 9 R1\_b hodnoty mikrotvrdosti
- Příloha 10 R2 hodnoty mikrotvrdosti
- Příloha 11 A2 hodnoty mikrotvrdosti
- Příloha 12 A3\_ZK hodnoty mikrotvrdosti